La Recherche

La Recherche

L'actualité des sciences

NOUVELLE FORMULE

Terres en vue !

Notre Galaxie abrite des milliards de planètes habitables

Polémique
Newton était-il un usurpateur ?

Vivre 140 ans
Du fantasme à la réalité

Alzheimer

Les progrès du dépistage

OCTOBRE 2015 DOM 7,40 € - BEL 7,40 € - LUX 7,40 € - ALL 8,20 € - ESP 7,40 € - GR 7,40 € - ITA 7,40 € - PORT.CONT 7,40 € - CAN 10,5 $ CAN - CH 12,40 FS - MAR 63 DH - TUN 6,50 TND - MAYOTTE 8,80 € - TOM SURFACE 970 XPF - TOM AVION 1620 XPF - ISSN 00295671

M 01108 - 504 - F: 6,40 € - RD

sommaire/octobre 2015 - n° 504

▲ **ÉVÉNEMENT :** *L'impact des éruptions volcaniques sur le climat*

▲ **DOSSIER :** *À la recherche de planètes habitables*

3 **ÉDITO**

4 **ENTRETIEN AVEC MARC PESCHANSKI ET FRÉDÉRIC REVAH**
« Nous travaillons comme des chercheurs d'or »
Propos recueillis par Sophie Coisne et Mathias Germain

12 **ILS ÉCRIVENT DANS CE NUMÉRO**

14 **COURRIER**

16 **L'ÉVÉNEMENT** Le climat refroidi par le volcanisme
par Julien Bourdet

20 actualités

20 **EN BREF**

22 **Physique** Surprenant record en supraconductivité

24 **Paléontologie** Des massacres déjà fréquents au Néolithique

25 **Cancérologie** Jean Feunteun : « Une mutation génétique réactive le programme de différenciation des cellules »

26 **Climat** La Californie s'enfonce

27 **Physique** L'antimatière nous échappe encore

28 **Santé** Une molécule pour effacer l'addiction ?

29 **Physique** Chevrons de séchage

30 **Biotechnologies** Des opioïdes produits à partir de levures

31 **LA CHRONIQUE MATHÉMATIQUE** Phénomènes universels dans un jeu de Puissance 4 *par Roger Mansuy*

34 dossier

ASTROPHYSIQUE

TERRES EN VUE !

34 Michel Mayor : « La quête d'exoplanètes est devenue un pan majeur de l'astrophysique »
Propos recueillis par Philippe Pajot

38 Quatre méthodes de détection des planètes
par Philippe Pajot

40 Atmosphères : leur composition se précise
par David Ehrenreich

43 Qu'est-ce qu'une planète habitable ?
par Vincent Glavieux

48 La bible des exoplanètes *par Jean Schneider*

50 fondamentaux

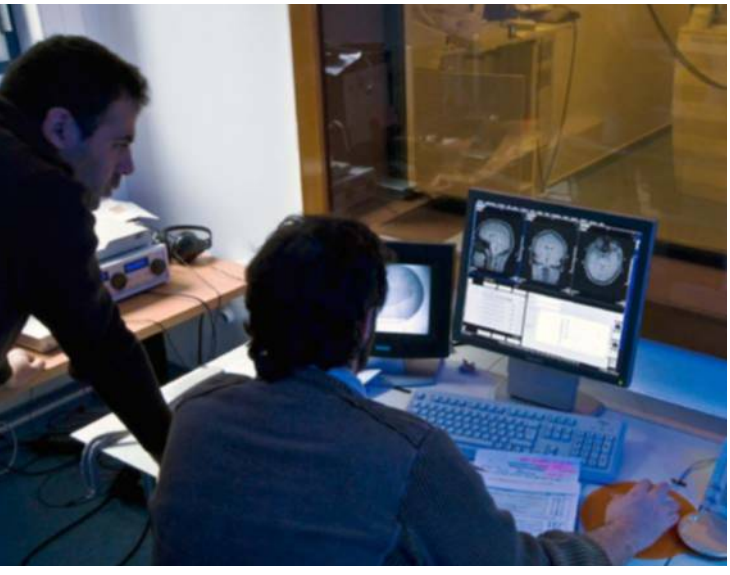
50 **CLIMAT** La fin programmée des glaciers
par Antoine Rabatel

55 **ENTOMOLOGIE** Abeilles recherchent experts désespérément *par Denis Michez et Pierre Rasmont*

59 **CHIMIE** Les neurones communiquent grâce à la lumière *par Thomas Grutter et Alexandre Specht*

64 **SANTÉ** Vers un dépistage précoce de la maladie d'Alzheimer *par Gautier Cariou*

N.CHELLMAN - NASA AMES/SETI INSTITUTE/JPL-CALTECH



▲ **FONDAMENTAUX :** *Mieux dépister la maladie d'Alzheimer*

▲ **IDÉES :** *Réflexions autour du transhumanisme*

70 **TECHNOLOGIE** Vote électronique : un scrutin à sécuriser
par Véronique Cortier

76 **HISTOIRE DES SCIENCES** Newton était-il un usurpateur ?
par Jean-Yves Cariou

79 idées

79 **VIVRE 140 ANS**
Du fantasme à la réalité

80 **MATIÈRE À PENSER**
La nouvelle condition humaine
par Viviane Thivent

84 **TRIBUNE DE FRANÇOIS BERGER, FRANCK LETHIMONNIER ET FRANÇOIS SIGAUX**
« Tuer la mort est un crime contre l'humanité »

87 **L'ŒIL DU PHILOSOPHE**
Ce que cache le désir d'immortalité
par Jean-Michel Besnier

89 **TRIBUNE DE LAURENT ALEXANDRE**
« Les transhumanistes ont gagné sans livrer bataille »

Retrouvez *La Recherche* sur RFI dans l'émission « Autour de la question »
rfi www.rfi.fr

96 guide

92 **LIVRES** La sélection du mois
96 **AGENDA** Les manifestations scientifiques

98 **LA QUESTION DE LA FIN**
Pourquoi mon rideau de douche me colle-t-il à la peau ?
par Clément Delorme

www.larecherche.fr

RECHERCHER
Les archives du magazine
Les sujets qui vous intéressent dans une base de plus de 20 000 articles.

S'INFORMER
L'actualité de la recherche
Retrouvez le blog des livres et l'agenda des manifestations scientifiques.

ACHETER
Abonnement et vente d'anciens numéros
Livres sélectionnés par *La Recherche*
Les outils du chercheur.

***La Recherche* sur twitter... Rejoignez-nous sur twitter pour un éclairage original sur la science et les technologies. http://twitter.com/maglarecherche**

Ce numéro comporte un encart abonnement *La Recherche* sur les exemplaires kiosque France et étranger (hors Suisse et Belgique) ; un encart abonnement Edigroup sur les exemplaires kiosque Suisse et Belgique ; un encart *Psychologie* sur les abonnés, une enveloppe Colas sur les abonnés des départements 78 et 92.

PATRICE LATRON/LOOK AT SCIENCES - COLIN ANDERSON/AGEFOTOSTOCK

ils écrivent dans ce numéro

Jean-Michel Besnier

PHILOSOPHE

Professeur à l'université Paris-Sorbonne, Jean-Michel Besnier y dirige l'équipe de recherche « Rationalités contemporaines ». Il est l'auteur de *L'Homme simplifié : le syndrome de la touche étoile* (Fayard, 2012) et sortira en octobre, avec Francis Brunelle et Florence Gazeau, *Un cerveau très prometteur* (Le Pommier). ■

Jean-Yves Cariou

MAÎTRE DE CONFÉRENCES

Professeur en sciences de l'éducation, il est aussi chercheur au Centre de recherches et de ressources en éducation et formation de l'université des Antilles et de la Guyane, et au laboratoire de didactique et d'épistémologie des sciences de l'université de Genève. En 2016 sortira son *Histoire des démarches scientifiques (Apt /Hermann).* ■

Véronique Cortier

CHERCHEUSE EN INFORMATIQUE

Depuis 2010, elle dirige le laboratoire de recherche en informatique et ses applications, à Nancy. Elle travaille sur la déduction automatique et la vérification des protocoles cryptographiques. Avec son équipe, Véronique Cortier contribue à l'amélioration des systèmes de vote par Internet. ■

David Ehrenreich

ASTROPHYSICIEN

Il travaille au sein de l'équipe Exoplanètes à l'Observatoire de l'université de Genève et il est impliqué dans le projet européen Cheops (acronyme en anglais de « satellite de caractérisation des exoplanètes »). La mission de ce satellite, qui doit être lancé en 2017 : étudier le transit des exoplanètes. ■

Thomas Grutter

BIOCHIMISTE

Directeur de recherche au CNRS, Thomas Grutter étudie les aspects moléculaires et biophysiques de récepteurs neuronaux, grâce à des nouvelles approches chimiques et neuro-pharmacologiques. Il travaille au laboratoire de conception et application de molécules bioactives de la faculté de pharmacie à l'université de Strasbourg. ■

Denis Michez

TAXONOMISTE

Son travail au laboratoire de zoologie, à l'université de Mons, en Belgique, porte sur l'évolution et la conservation des abeilles sauvages. Pour lui, *« la conservation de la biodiversité demande une meilleure connaissance de celle-ci. Soutenir la taxonomie, science de la classification du vivant, c'est préserver la biodiversité »*. ■

Antoine Rabatel

PHYSICIEN

Au laboratoire de glaciologie et géophysique de l'environnement de l'université de Grenoble, Antoine Rabatel s'intéresse au suivi des glaciers de montagne, à travers une approche mêlant télédétection et mesures *in situ*. Depuis 2015, il est responsable de l'équipe Cryosphère et hydrologie de montagne. ■

Pierre Rasmont

ZOOLOGUE

Il dirige le laboratoire de zoologie à l'université de Mons, spécialisé dans les abeilles sauvages et les bourdons. *« Il est essentiel de reconnaître et de nommer correctement ce que nous étudions,* explique-t-il. *Car, comme le disait Albert Camus, "les choses mal nommées participent au malheur du monde". »* ■

Jean Schneider

ASTROPHYSICIEN

Il est l'un des premiers à avoir proposé, dès 1988, de détecter les planètes extrasolaires par la méthode des transits. Militant de l'exobiologie, Jean Schneider est persuadé que la vie extraterrestre existe quelque part, au moins sous forme de micro-organismes, de lichens ou de végétation. ■

Alexandre Specht

CHIMISTE ORGANICIEN

Chargé de recherche au CNRS, Alexandre Specht développe de nouveaux outils photochimiques pour l'étude de processus biologiques, à l'interface de la chimie et de la neurobiologie. Il travaille au laboratoire de conception et application de molécules bioactives de la faculté de pharmacie à l'université de Strasbourg. ■

DR - JESSICA CHAMPEAUX - INRIA/KAKSONEN

UNE BANQUE CRÉÉE PAR DES COLLÈGUES, ÇA CHANGE TOUT.

MA BANQUE EST DIFFÉRENTE,
CEUX QUI LA GÈRENT SONT COMME MOI.

Le Crédit Mutuel Enseignant est une banque authentiquement coopérative dédiée au monde de l'éducation, de la recherche et de la culture.
Il développe un service de bancassurance sur mesure et place depuis toujours la qualité de son offre au cœur de ses préoccupations.

Crédit Mutuel
Enseignant

RCS Strasbourg B 588 505 354 – 09/15 – Crédit photos : plainpicture/Fancy Images/Maskot/OJO.

Adresse électronique : courrier@larecherche.fr

ARCHÉOLOGIE

DATER LE PASSÉ

Curieusement, dans l'article sur la grotte de Cussac (*La Recherche* n° 501-502, p. 90), les dates sont indiquées par rapport au « présent », par exemple « 34 500 à 25 000 avant le présent ». Le « présent » change chaque jour, ce n'est donc pas une référence absolue. Pourquoi ne pas dater par rapport à la date (supposée) de naissance de Jésus-Christ, selon la terminologie admise?

Courriel de Paul de Cointet

La réponse de Jacques Jaubert: «Avant le présent» est une date fixe, 1950, année de mise au point de la méthode de datation au carbone 14 par l'Américain Willard Frank Libby, à Chicago. Depuis, cette convention est utilisée par les géologues, les climatologues et les préhistoriens travaillant sur des périodes du Plio-Pléistocène (il y a 1 à 3 millions d'années). À partir de l'Holocène (10 000 ans avant notre ère), les préhistoriens et protohistoriens s'expriment en années BC («before Christ», avant Jésus-Christ).

CANCÉROLOGIE

LES LIMITES DES ORGANOÏDES

L'article « Nouvel outil pour personnaliser les traitements » (*La Recherche* n° 501-502, p. 22) explique que les organoïdes sont changés en tumeurs *« en supprimant de leur milieu de culture une protéine essentielle à la croissance normale des cellules »*. Est-ce vraiment le cas? Nathalie Vergnolle indique par ailleurs que son équipe utilise déjà cette méthode pour reproduire des tissus du colon, de la prostate et de la vessie : peut-on faire des organoïdes pour n'importe quel organe?

Courriel de Laurence Gagnard

La réponse de Marc van de Wetering: Nous ne transformons pas des cellules saines en cellules cancéreuses : en retirant la protéine essentielle à la croissance des cellules saines, nous sélectionnons les cellules cancéreuses qui, elles, n'ont pas besoin de cette protéine pour se multiplier. Cela nous permet de mieux mesurer les effets d'un médicament sur les cellules cancéreuses. Ensuite, les organoïdes sont des structures en trois dimensions cultivées à partir de cellules d'un tissu primaire, isolées chez le patient. Les lignées de cellules cancéreuses peuvent aussi croître en trois dimensions, et sont parfois appelées organoïdes, mais ne ressemblent pas aux cellules du patient. Jusqu'à aujourd'hui, les expériences se concentrent sur certains types de tissus dits « épithéliaux ». Tous les tissus ne sont pas encore cultivables, mais nous pensons que ce n'est qu'un obstacle technique.

Le réchauffement fait de l'ombre à l'élevage

COP21

LES BIENFAITS DU BOCAGE

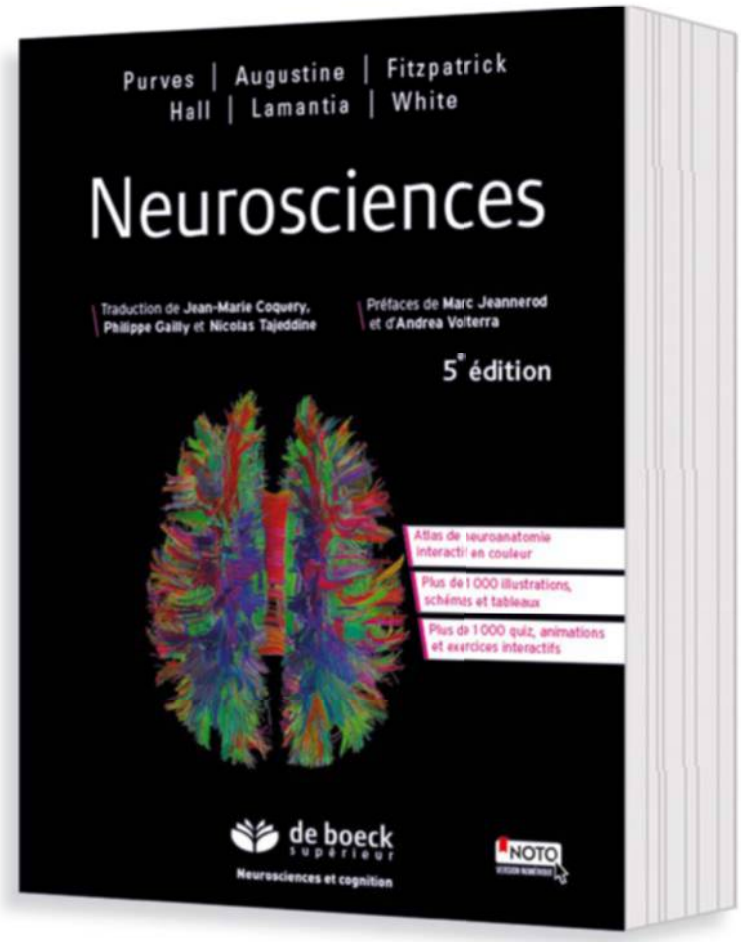
L'article sur le réchauffement climatique et l'élevage (*La Recherche* n° 501-502, p. 86) pose de vraies questions. Tenter de revenir à un élevage moins intensif avec des races plus rustiques et adaptées au secteur, réhabiliter un pâturage naturel étalé sur l'année, favoriser un couvert herbacé pérenne et diversifié accompagné de polyculture, utiliser des arbres et haies pour le fourrage et l'ombre semblent de très bons objectifs. Cette expérience aboutit donc à réinventer le bocage qui existe chez nous depuis des siècles ; pourquoi donc ne pas citer ce paysage, exemple de système traditionnel durable remplissant déjà ce cahier des charges? Autre question : alors que les bienfaits des bocages français sont reconnus depuis quarante à cinquante ans pour le microclimat, le maintien des sols, le bien-être du bétail, la biodiversité, pourquoi continuer à les détruire de nos jours? Cela m'attriste de traverser certaines régions où l'on voit le gros bétail tirer la langue sous la canicule car tous les arbres et les haies ont été abattus aux alentours ; ce sont bien ceux qui ont décidé cette destruction qui seront responsables de la baisse de rendement!

Courriel d'Olivier Manneville

La réponse de Sandra Novak: Le bocage est effectivement un paysage rural présentant de nombreux atouts et je trouve aussi qu'il mérite d'être mentionné dans le cadre des solutions vis-à-vis du changement climatique. Mais l'expérimentation menée par l'Inra à Lusignan ne consiste pas à réinventer le bocage ; elle vise à étudier de nouvelles pistes d'agroécosystèmes, économes et productifs, en s'intéressant notamment à la diversification des fourrages, aux arbres intraparcellaires et aux croisements de race.

Sauf mention contraire de leur auteur, toute lettre parvenue à la rédaction de *La Recherche* est susceptible d'être éditée et publiée, en tout ou en partie, dans le journal. Les lettres concernant un auteur extérieur à la rédaction de *La Recherche* lui sont envoyées. Sans réaction de l'auteur dans un délai raisonnable, nous les considérons comme publiables en tout ou en partie, sans attendre une éventuelle réponse de sa part. Dans la mesure du possible, évitez les fax et les lettres manuscrites.

LA RÉFÉRENCE EN **NEUROSCIENCES**



D. Purves, G. J. Augustine, D. Fitzpatrick, W. Hall, A.-S. Lamantia et L. White

Préfaces : Marc Jeannerod et Andrea Volterra

Traduction : J.-M. Coquery, Ph. Gailly et N. Tajeddine

5e édition 2015 • 864 pages • 9782807300026 • 75 €

- Toutes les **notions de base** et l'**ensemble des nouvelles avancées,** en particulier dans le domaine du développement du système nerveux
- **1000 illustrations, schémas et tableaux** en couleur
- **31 chapitres** multipliant les approches et les niveaux d'analyse : moléculaire, cellulaire, physiologique, comparée, humaine, clinique, cognitive et comportementale
- **Glossaire visuel**
- **Version numérique** NOTO VERSION NUMÉRIQUE
- **1000 quiz, animations** et **exercices interactifs**

+ Atlas interactif de neuroanatomie humaine puissant et fonctionnel, véritable outil d'exploration et d'étude du système nerveux humain

En librairie et sur www.deboecksuperieur.com

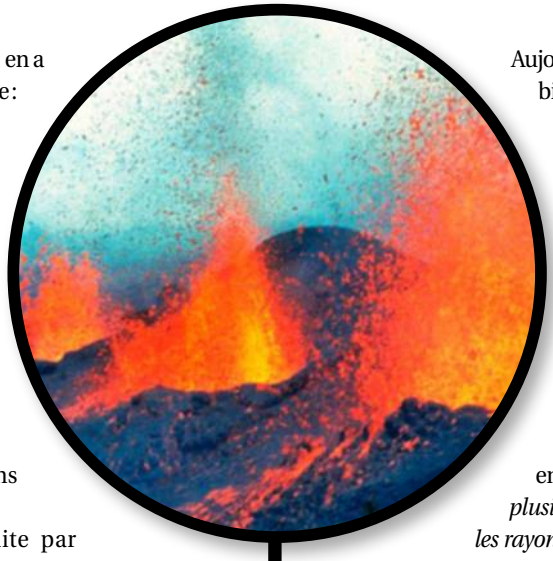
de boeck supérieur

Le climat refroidi par le volcanisme

Les éruptions volcaniques de forte intensité ont un impact majeur sur les variations climatiques. Un constat étayé par les analyses de glaces et de cernes d'arbres.

Par Julien Bourdet, journaliste

L'activité du Pinatubo en 1991 en a clairement apporté la preuve : en éjectant d'énormes quantités de gaz et de poussières dans l'atmosphère, les éruptions volcaniques de grande ampleur sont capables de modifier l'absorption du rayonnement solaire et de refroidir ainsi la planète pendant plusieurs années – de 0,5 °C en moyenne sur tout le globe pendant plus de deux ans pour le volcan des Philippines. Mais jusqu'ici, l'impact du volcanisme ancien sur les fluctuations naturelles du climat restait mal connu. Une équipe internationale conduite par Michael Sigl, du Desert Research Institute à Reno, aux États-Unis, vient combler ce manque. Et donne plus de poids encore à l'idée que les volcans ont un impact majeur sur le climat : grâce à des analyses de la glace du Groenland et de l'Antarctique, qui a gardé la trace des éruptions, et de cernes d'arbres, indicateurs des variations de température, les chercheurs ont montré qu'au cours des derniers 2 500 ans, sur les 16 étés les plus froids enregistrés dans l'hémisphère Nord, 15 ont directement fait suite à une éruption volcanique majeure (1).



▲ *Le Piton de la Fournaise, à La Réunion, en éruption en mars 1986.*

Aujourd'hui, les scientifiques comprennent bien comment les éruptions volcaniques peuvent refroidir la surface terrestre. « *Lorsque le panache du volcan atteint la stratosphère, à plus de 10 kilomètres d'altitude, un gaz qu'il contient, le dioxyde de soufre, subit des réactions chimiques et forme alors de minuscules gouttelettes d'acide sulfurique,* explique Mélanie Baroni, du Centre européen de recherche et d'enseignement des géosciences de l'environnement, à Aix-en-Provence. *Or ces aérosols, qui mettent plusieurs années avant de retomber, diffusent les rayons solaires et les renvoient en partie vers l'espace, d'où un refroidissement au sol* ». La quantité de lumière bloquée par cet « effet parasol » dépend de la puissance de l'éruption, ainsi que de la position du volcan sur la planète. « *À magnitude égale, les éruptions qui ont lieu près de l'équateur ont un effet climatique plus global que les éruptions des hautes latitudes car, du fait de la circulation stratosphérique, leurs aérosols sont transportés dans les deux hémisphères* », précise la géophysicienne. Lorsqu'elles retombent au sol au niveau des régions polaires, les particules soufrées sont piégées dans la

RAPHAEL GAILLARDE/GAMMA

Repères

- Sur les 16 étés les plus froids enregistrés en 2 500 ans, 15 ont suivi une éruption volcanique majeure.
- Pour dater ces événements, l'équipe internationale menée par Michael Sigl a utilisé une nouvelle méthode d'analyse des particules volcaniques piégées dans les glaces du Groenland et de l'Antarctique.
- Cette datation permet de démontrer sans ambiguïté un lien de cause à effet entre ces éruptions et une baisse de température sur la planète dans les mois qui suivent.

▲ *Cette carotte de glace prélevée au Groenland, est l'un des 20 échantillons analysés par l'équipe de Michael Sigl.*

NICHELLMAN

glace, qui garde ainsi la mémoire des éruptions successives. En analysant ces glaces, les scientifiques ont pu, dès les années 1970, reconstituer l'histoire des éruptions qui se sont succédé sur Terre, année par année. L'épaisseur des dépôts de soufre permettant d'estimer l'importance de chaque éruption. *« Le problème, c'est que jusqu'à présent, nous n'avions pas réussi avec cette méthode à dater les événements de façon suffisamment précise, particulièrement pour ceux qui ont eu lieu avant l'an 1000,* note Joël Savarino, du laboratoire de glaciologie et géophysique de l'environnement, à Grenoble. *Il pouvait y avoir des incertitudes de plus de dix ans pour certaines éruptions. »*
Dans ces conditions, il était très difficile de comparer ces données avec les courbes de variations de températures annuelles fournies par l'étude des cernes d'arbres qui, elles, sont entachées de beaucoup moins d'erreurs. Ces marques imprimées dans le tronc des arbres permettent de calculer le taux de croissance de ces derniers d'une année à l'autre, et d'en déduire les températures correspondantes. Du coup, les climatologues suspectaient fortement un lien entre les éruptions passées et des chutes de températures sur le globe, mais sans pouvoir l'établir de façon certaine.

MESURES DES VOLUMES D'AÉROSOLS

Les travaux de Michael Sigl et de ses collègues viennent changer la donne. Les chercheurs ont en effet daté avec une précision inégalée les éruptions volcaniques sur les 2 500 dernières années. Pour y parvenir, ils ont analysé plus d'échantillons de glace que lors des études précédentes. Au total, ce sont plus de 20 carottes de glace prélevées sur six sites au Groenland et en Antarctique qu'ils ont passées au crible. Le fait d'avoir un grand nombre d'échantillons provenant d'autant de régions différentes et des deux hémisphères leur a permis de mieux •••

••• estimer le volume d'aérosols émis par chaque éruption et de dire si les éruptions s'étaient produites à proximité de l'équateur, dans l'hémisphère Nord ou dans l'hémisphère Sud.
Qui plus est, l'équipe a utilisé une méthode de pointe pour analyser ses échantillons. Au lieu de découper chaque carotte pour l'étudier tranche par tranche comme cela se fait souvent, les chercheurs l'ont fait fondre lentement à une extrémité. L'eau ainsi produite a été analysée en continu par un spectromètre de masse qui a dévoilé la succession des dépôts soufrés avec une très grande précision.

L'HISTOIRE DU VOLCANISME RECONSTITUÉE

Enfin, et c'est là la plus grande avancée accomplie par le groupe de Michael Sigl : il a démontré que les dates attribuées jusqu'ici aux éruptions du passé avaient été décalées à tort de sept ans. Comment ? En identifiant la présence anormalement élevée dans une couche de leurs échantillons d'un élément chimique particulier, le béryllium 10. Cet isotope aurait été produit dans l'atmosphère terrestre par un événement astrophysique violent, peut-être une supernova. Or, ce même événement a laissé également une trace dans les cernes des arbres – sous la forme d'un pic de carbone 14 – où on a pu déterminer avec précision qu'il s'est produit en 775. *« En synchronisant leurs profils de glace avec cet événement, ils ont pu réajuster la chronologie des éruptions volcaniques,* commente Joël Savarino. *Ce faisant, ils ont montré sans ambiguïté un lien de cause à effet entre ces éruptions et une baisse de températures sur la planète. »*
La nouvelle histoire écrite par les scientifiques révèle ainsi près de 300 éruptions importantes, dont une quarantaine ont été majeures (lire ci-dessous). Et elle met en évidence qu'après chacune de ces éruptions de grande

▲ *Lors de son éruption en 1991, le Pinatubo, aux Philippines, a émis un panache d'aérosols et de cendre de 10 km³, provoquant un refroidissement de 0,5° C sur l'hémisphère Nord.*

ARLAN NAEG/AFP

Quatre grandes éruptions des derniers 2 500 ans

540

Ilopango, Salvador

AMPLEUR. L'éruption a laissé derrière elle une dépression, ou caldeira, sous-marine de 11 km sur 8.

EFFETS. Froid, pluie et inondations ont entraîné des famines et des épidémies, lesquelles auraient contribué, selon certains, à la chute de l'Empire romain.

1258

Samalas, Indonésie

AMPLEUR. Le panache du volcan est monté à plus de 40 km d'altitude et des nuées ardentes ont parcouru jusqu'à 25 km, ensevelissant une cité entière, comme le fut Pompéi.

EFFETS. Certains pensent que l'éruption aurait pu déclencher le Petit Âge glaciaire, un épisode de très grand froid et de famines dans l'hémisphère Nord.

1783

Laki, Islande

AMPLEUR. L'éruption a produit environ 15 km³ de lave et près de 1 km³ de cendres.

EFFETS. En Islande, les retombées de cendres ont provoqué la mort par intoxication de 80 % des moutons, 50 % des bovins et des chevaux, 20 % de la population, réduite à la famine. En Europe, les vagues de froid causées par l'éruption ont fait chuter les récoltes.

1815

Tambora, Indonésie

AMPLEUR. Le panache du volcan a atteint 44 km d'altitude et engendré des nuées ardentes pénétrant dans la mer jusqu'à 40 km de distance.

EFFETS. L'éruption aurait provoqué directement la mort de plus de 60 000 personnes et causé en 1816 dans l'hémisphère Nord « l'année sans soleil », la plus froide jamais enregistrée.

ampleur, la température enregistrée dans l'hémisphère Nord a chuté de manière notable dans l'année qui a suivi. Cette baisse, proportionnelle à l'intensité de l'éruption, et plus accentuée pour des volcans situés à l'équateur, a atteint plus de 2 °C dans les cas les plus extrêmes, et s'est prolongée parfois pendant près de dix ans.

« *Ces observations semblent attester que l'activité volcanique joue un rôle prépondérant dans la variabilité naturelle du climat, en tout cas à l'échelle annuelle et décennale* », juge Joël Savarino. Une influence qui pourrait donc dépasser celle d'un autre acteur naturel du climat : l'activité solaire. Les scientifiques suspectent que les humeurs de notre étoile puissent avoir elles aussi un impact important sur les variations de températures globales. Même si, pour le moment, cette hypothèse n'a pas pu être confirmée avec certitude.

Fort de ce constat, les climatologues vont pouvoir maintenant améliorer leurs modèles afin d'obtenir des prédictions plus précises quant à l'impact des activités humaines sur le réchauffement climatique en cours (lire ci-contre). En effet, ce n'est qu'en reconstituant de manière fine l'influence des facteurs naturels sur le climat avant le début de l'ère industrielle, il y a cent cinquante ans, qu'il sera possible d'évaluer correctement l'impact de l'homme depuis cette période.

DÉCLIN DE L'EMPIRE ROMAIN

Ces résultats , qui confirment le rôle majeur des éruptions sur le climat, montrent aussi que ces événements peuvent avoir des conséquences dramatiques sur les sociétés. Grâce aux témoignages historiques, on considérait déjà que les éruptions avaient pu causer des périodes de froid particulièrement sévères qui avaient alors anéanti les récoltes et provoqué des famines. Ce fut le cas par exemple lors de l'éruption du Laki, en Islande, en 1783, ou celle du Tambora en Indonésie en 1815.

Les chercheurs vont même plus loin. Selon eux, l'activité volcanique aurait contribué au déclin de l'Empire romain au VI[e] siècle de notre ère. À l'appui de ce scénario : l'enregistrement de deux éruptions volcaniques majeures ayant eu lieu en 535 et en 540. D'après les analyses de cernes d'arbres, la première éruption aurait fait baisser les températures enregistrées en Europe pendant l'été de 2,5 °C par rapport à la moyenne des 30 années précédentes. La deuxième éruption, plus puissante encore, aurait renforcé cet effet, faisant perdurer le froid jusqu'en 550, et provoqué au passage des famines et des épidémies de peste. Pour les auteurs, c'est la concomitance de ces deux éruptions qui aurait donné le coup de grâce à un empire déjà sur le déclin. ■

(1) M.Sigl *et al, Nature, 523,* 543, 2015.

DR

« Le but est de chiffrer le forçage anthropique »

Myriam Khodri est chercheuse au laboratoire d'océanographie et du climat : expérimentation et approches numériques. Elle est spécialiste de simulation du climat.

Pourquoi est-il important de simuler l'influence du volcanisme dans les modèles climatiques ?

Le réchauffement climatique global observé depuis le début de l'ère industrielle s'explique surtout par les émissions de gaz à effet de serre dues aux activités humaines. Mais pour bien chiffrer la part exacte de ce « forçage anthropique », il faut comprendre l'impact sur le climat des forçages naturels, le volcanisme en particulier. Pour cela, nous simulons les effets d'une éruption volcanique *via* un modèle climatique qui reproduit les échanges entre les océans et l'atmosphère. Puis nous confrontons les résultats de ce modèle aux enregistrements paléoclimatiques de ces 2000 dernières années. Ainsi, nous pouvons analyser comment le climat a varié face à un tel forçage à l'échelle de plusieurs années ou de plusieurs décennies, et mieux prévoir comment il réagira, sur ces mêmes échelles de temps, face au forçage anthropique.

Comment bien quantifier les effets d'une éruption ?

Il ne faut écarter aucun phénomène. Le modèle que nous avons développé avec d'autres collègues prend ainsi en compte de multiples paramètres : localisation des volcans, saison de l'éruption, altitude du panache ; et il reproduit en détail le cycle de vie des aérosols volcaniques dans l'atmosphère, ceux-là même qui bloquent une partie du rayonnement solaire et tendent à refroidir la surface de la Terre. Grâce à ce modèle, nous avons montré que deux des plus grandes éruptions du dernier millénaire, celles du Tambora et du Samalas, toutes deux en Indonésie, ont induit, à l'échelle de l'hémisphère Nord, un refroidissement moyen oscillant entre 0,8 et 1,3 °C pendant les étés 1258 et 1816. En accord avec les données de température déduites par l'étude de cernes d'arbres. Une première (1).

Quelles incertitudes demeurent ?

Après une grande éruption, notre modèle montre que le refroidissement persiste pendant trois ans, le temps que les aérosols retombent au sol. Mais on sait aussi que ce refroidissement peut parfois se prolonger plus longtemps, pendant une dizaine d'années. C'est le cas lorsque deux éruptions sont rapprochées dans le temps. On pense que cela s'explique par le fait que l'océan est lui aussi refroidi mais qu'il met plus de temps à se réchauffer. Il y aurait un effet cumulatif des éruptions que l'océan garderait en mémoire. Actuellement, les climatologues cherchent à mieux comprendre ce phénomène. ■

Propos recueillis par Julien Bourdet

(1) M. Stoffel *et al, Nature Geoscience,* doi :10.1038/ngeo2526, 2015.

À la CASDEN, le collectif est notre moteur !

Banque coopérative créée par des enseignants, la CASDEN repose sur un système alternatif et solidaire : la mise en commun de l'épargne de tous pour financer les projets de chacun.
Comme plus d'un million de Sociétaires, faites confiance à la CASDEN !

Découvrez la CASDEN sur www.casden.fr ou contactez un conseiller au 01 64 80 64 80*

Accueil téléphonique ouvert du lundi au vendredi de 8h30 à 18h30 (heure de Paris). Appel non surtaxé. Coût selon votre opérateur.

L'offre CASDEN est disponible dans les Délégations Départementales CASDEN et les agences Banques Populaires.

casden BANQUE POPULAIRE

CASDEN, la banque coopérative de l'éducation, de la recherche et de la culture

CASDEN Banque Populaire - Société Anonyme Coopérative de Banque Populaire à capital variable. Siège social : 91 Cours des Roches - 77186 Noisiel. Siret n° 784 275 776 00842 - RCS Meaux. Immatriculation ORIAS n° 07 027 138
BPCE - Société anonyme à directoire et conseil de surveillance au capital de 155 742 320 €. Siège social : 50 avenue Pierre Mendès France - 75201 Paris Cedex 13. RCS PARIS n° 493 455 042. Immatriculation ORIAS n° 08 045 100
BROCA & WERNICKE - Illustration : Killoffer.

BIOLOGIE

POURQUOI LES PERLES DES HUÎTRES SONT RONDES

Comment les huîtres parviennent-elles à produire des perles parfaitement sphériques ? En les faisant tourner sur elles-mêmes à raison d'un tour toutes les cinq heures environ ! Pour observer le processus à l'intérieur du mollusque, une équipe de l'Ifremer et de l'université de Tahiti a eu l'idée d'utiliser un champ magnétique. Les chercheurs ont introduit dans des huîtres d'élevage des particules magnétiques de 6,6 millimètres de diamètre en guise de nucleus qui sert d'amorce à la perle. Elles ont été suivies toutes les demi-secondes à l'aide d'un magnétomètre ultrasensible, ce qui a permis d'observer une rotation de la particule sur laquelle se fixe la nacre. Durant les 40 premiers jours en moyenne, la perle est animée de mouvements chaotiques. Peu à peu, ils deviennent plus réguliers, avec toutefois de fortes variations d'intensité qui peuvent entraîner des défauts. La vitesse de rotation moyenne établie à partir de l'étude de 15 huîtres est de 1,27 degré d'angle par minute, soit un tour complet en 4 h 43. Cette rotation se poursuit tant que l'huître continue à produire de la nacre, pendant douze à dix-huit mois.

Y. Gueguen *et al., Royal Society Open Science,* doi: 10.1098/rsos.150144, 2015.

▲ *Pour obtenir une perle sphérique, le nucleus tourne sur lui-même toutes les cinq heures.*

PHYSIQUE

DES NEUTRINOS AU CŒUR DE LA TERRE

Et si la physique des particules dévoilait l'intérieur de la Terre ? En particulier le manteau terrestre, encore mystérieux. C'est l'idée de chercheurs au laboratoire italien de Gran Sasso.
On sait déjà que ce manteau contient des éléments radioactifs, tel l'uranium, qui émettent un antineutrino en se désintégrant. Puisqu'il vient des entrailles de la Terre, les physiciens appellent cette particule géoneutrino. Il interagit peu avec les autres particules, ce qui le rend difficile à capter. Avec leur détecteur de 278 tonnes de scintillateur liquide, les chercheurs n'ont observé « que » 12 signatures de géoneutrinos en provenance du manteau entre 2007 et 2015 ! Mais cela a permis de calculer que la radioactivité du manteau serait responsable de 50 à 70 % de la chaleur émise par la Terre dans l'espace, soit le double des précédentes estimations.

M. Agostini *et al., (Collaboration Borexino), Phys. Rev. D, 92,* 031101, 2015.

SANTÉ

CONTRECARRER LES ANTI-VACCINS

En 2014, aux États-Unis, 644 cas de rougeole ont été recensés, soit trois fois plus qu'en 2013. En cause : l'augmentation du nombre de parents refusant de vacciner leurs enfants. Comment les faire changer d'avis ? En les convaincant du danger de la non-vaccination plutôt qu'en déconstruisant les mythes du vaccin.
Pour vérifier cette hypothèse, des chercheurs ont invité un groupe de personnes à exprimer leur opinion sur différents sujets, dont la vaccination. Puis elles ont reçu aléatoirement soit des informations sur les maladies encourues en absence de vaccination, soit un résumé d'études montrant l'absence de lien entre l'autisme et les vaccins, soit des informations sur un autre sujet scientifique. Le plus grand changement (positif) de mentalité envers la vaccination a eu lieu chez les personnes ayant reçu le premier type d'information.

Z. Horne *et al., PNAS,* doi: 10.1073/pnas.1504019112, 2015.

PALÉOBOTANIQUE

LA PLUS VIEILLE FLEUR DU MONDE

Baptisée *Montsechia vidalii,* c'est une plante âgée de 125 à 130 millions d'années, sans pétale ni racine, mais pourvue de nombreuses et minuscules fleurs. Les fossiles avaient été trouvés il y a plus de cent ans dans des dépôts de calcaire des Pyrénées espagnoles, où la plante poussait en abondance dans ce qui était alors des lacs d'eau douce. Cette découverte est essentielle pour mieux comprendre l'évolution des angiospermes, c'est-à-dire des plantes à fleurs, dont la diversification est encore peu documentée.

D.L. Dilcher *et al., PNAS,* doi: 10.1073 pnas.1509241112, 2015.

▲ *Les fossiles de* Montsechia vidalii *ont été découverts il y a plus de cent ans.*

DORLING KINDERSLEY/UIG/SCIENCE PHOTO LIBRARY/COSMOS - DAVID DILCHER/AFP

“NOUS N’AVANÇONS PAS ASSEZ VITE (…) LE CLIMAT CHANGE PLUS RAPIDEMENT QUE NOS EFFORTS POUR Y RÉPONDRE ”

BARACK OBAMA
sur le changement climatique lors de son déplacement en Alaska le 31 août 2015.

ASTRONOMIE

La lente mort de l’Univers

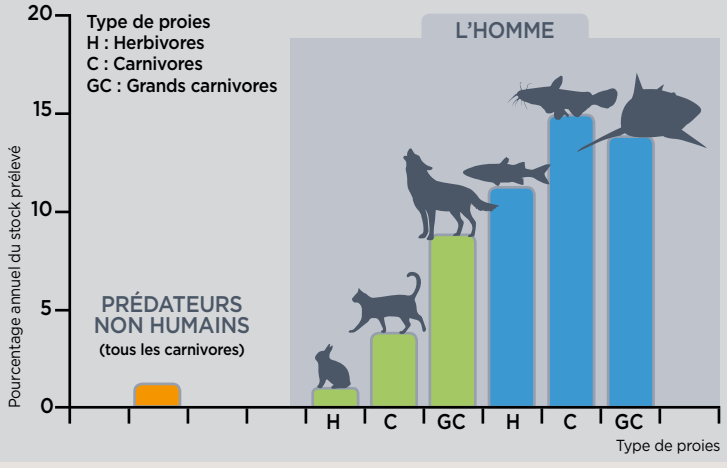
L’Univers s’éteint peu à peu, c’est confirmé. Les scientifiques ont mesuré, à l’aide de télescopes, l’énergie rayonnée par 200 000 galaxies. Verdict : une section d’Univers produit aujourd’hui deux fois moins d’énergie qu’il y a 2 milliards d’années.
S. Driver *t al., MNRAS,* soumis, 2015.

61 %

INDICATEUR

DES ÉTUDES DE PSYCHOLOGIE NE SONT PAS REPRODUCTIBLES. C’est ce que révèle une équipe de 270 chercheurs après avoir reproduit une centaine de protocoles expérimentaux d’articles scientifiques.
Open Science Collaboration, *Science, 349,* 949, 2015.

L’homme superprédateur



▲ **L’analyse de 2125 cas de prédation recensés dans le monde révèle que nous tuons 14 fois plus de proies adultes que les autres prédateurs. Fait inquiétant : les grands carnivores figurent tout en haut de notre tableau de chasse. Ils sont tués principalement pour les trophées. Cette prédation intensive sur terre et en mer fait diminuer le nombre de reproducteurs et pourrait déséquilibrer notre écosystème.** C. Darimont *et al., Science, 349,* 858, 2015.

MATÉRIAUX

UN CONCURRENT AU GRAPHÈNE

Cousin du graphène, le statène vient d’être synthétisé pour la première fois. Constitué d’une couche unique d’atomes d’étain en nid-d’abeilles, le statène pourrait conduire le courant électrique sans perte d’énergie. En théorie. Les équations prévoient en effet que les électrons y circulent sans jamais entrer en collision. Une propriété à vérifier.
F. Zhu *et al., Nat. Mater.,* doi:10.1038/nmat4384.

“Si le boson de Higgs est vraiment une particule composite, cela signifie que de nouvelles forces sont là, juste derrière, qui restent à découvrir”

Adam Falkowski, physicien au CNRS, après de nouvelles expériences obtenues cette année au Cern, à Genève.

ENVIRONNEMENT

Micro-organismes à tous les étages

Des biologistes américains ont inspecté près de 1 200 foyers pour chercher des micro-organismes. Ils ont relevé 125 066 variétés de bactéries et 72 284 espèces de champignons. Ils ont constaté que les bactéries fécales et celles liées à la peau sont plus abondantes dans les maisons avec peu de femmes.
Albert Barberán *et al., Proc. R. Soc. B,* doi: 10.1098/rspb.2015.1139, 2015.

Surprenant record en supraconductivité

Pour la première fois, un matériau conduit le courant sans résistance au-dessus de la barre symbolique des -100 °C. Sa composition, à base de sulfure d'hydrogène, défie les prédictions des spécialistes.

Pour les êtres humains, -73 °C est considéré comme une température extrêmement froide. Pour les matériaux supraconducteurs, dont la caractéristique est de conduire l'électricité sans résistance, c'est l'inverse : jamais l'un d'entre eux n'avait conservé cette capacité jusqu'à une température aussi élevée. La performance – c'est la première fois qu'un matériau reste supraconducteur à une température supérieure à -100 °C – a été obtenue par l'équipe de Mikhail Eremets, de l'Institut Max-Planck pour la chimie, à Mayence, en Allemagne. Plus surprenant encore pour nombre de spécialistes : elle a été réalisée avec du sulfure d'hydrogène, matériau que l'on croyait incapable de rester supraconducteur à une température aussi élevée (1).

La supraconductivité est un phénomène quantique macroscopique, qui a été observé pour la première fois en 1911 par Kamerlingh Onnes. Le physicien néerlandais s'interrogeait alors sur le comportement du courant électrique dans un métal dont la température se rapproche du zéro absolu (-273,15 °C) : la circulation des électrons dans le matériau continue-t-elle à se faire normalement ou, sous l'effet du froid, est-elle freinée davantage par les atomes et les défauts du matériau ? Autrement dit, la résistance électrique augmente-t-elle ?

Onnes tenta l'expérience avec du mercure, qu'il refroidit dans de l'hélium liquide. Surprise : loin d'augmenter ou même de rester stable, comme il le supposait, la résistance électrique du mercure chuta brusquement à zéro et la conductivité devint infinie, d'où le nom de supraconductivité.

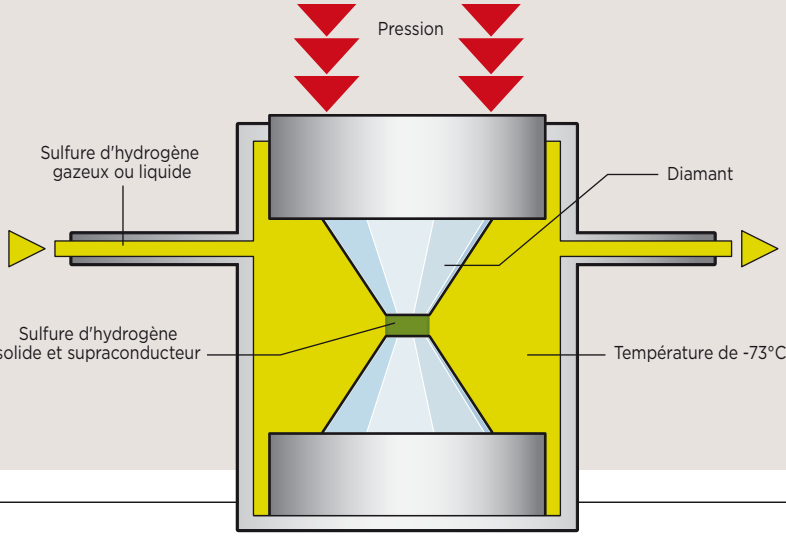
L'explication classique de la supraconductivité – la théorie BCS, formulée en 1957 – envisage la création de paires d'électrons. Le mécanisme est le suivant : quand un électron, de charge négative, circule, il a tendance à attirer les atomes du matériau, chargés positivement. Comme les atomes sont bien plus lourds que les électrons, ils se déplacent vers l'électron avec retard. Le déplacement des atomes vers l'électron (qui est déjà parti) crée localement un excès de charge positive. Un second électron est alors attiré par l'excès de charge positive créé par le passage du premier électron. De cette façon se crée une interaction de nature attractive entre les deux électrons, via les vibrations des atomes – les phonons.

QUÊTE DES HAUTES TEMPÉRATURES

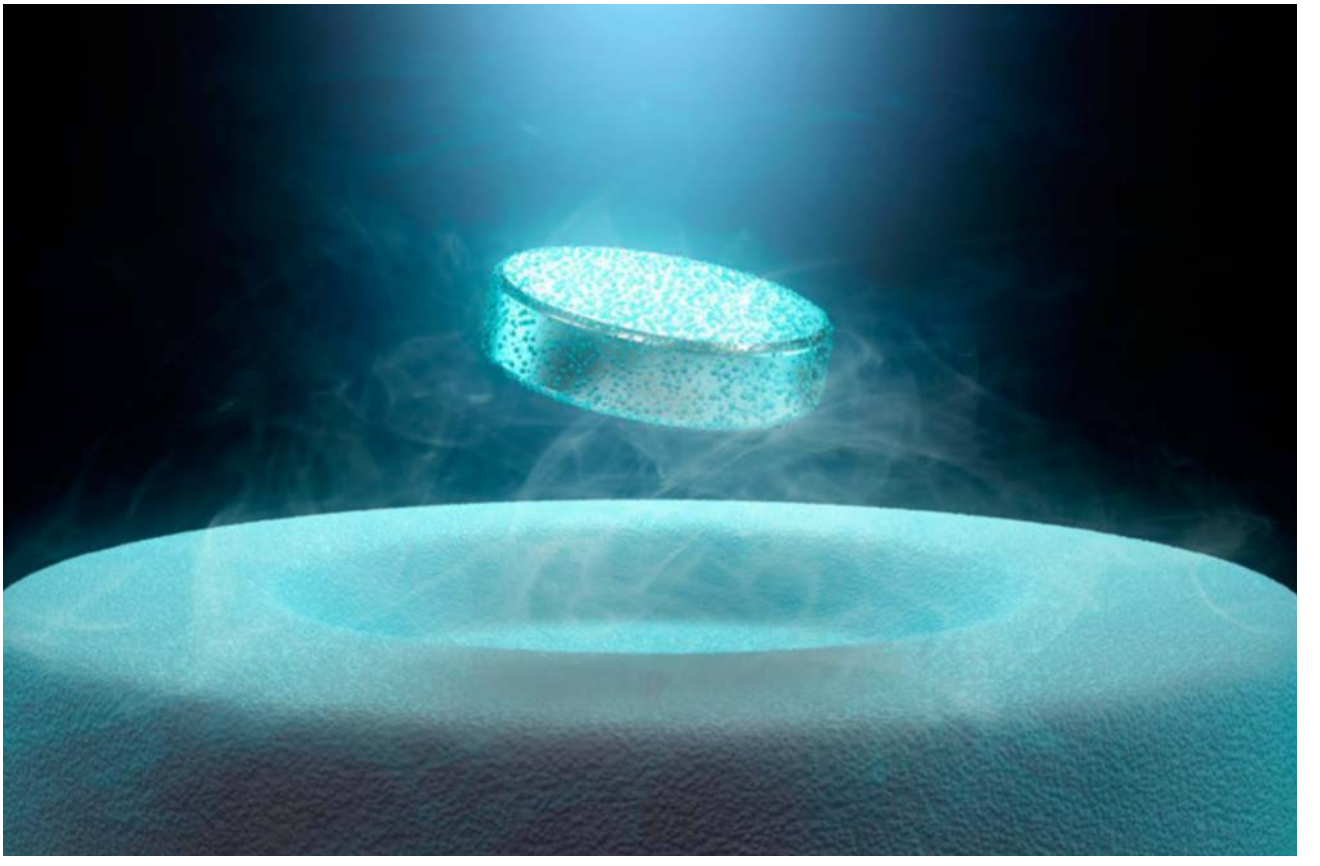
L'un des avantages de la supraconductivité est de supprimer les pertes dans le transport d'électricité. Ainsi, on commence à installer des câbles supraconducteurs dans des zones urbaines denses. Mais comme les matériaux classiques ne sont supraconducteurs qu'à très basses températures, il faut considérablement refroidir ces câbles, ce qui limite leur utilisation. D'où l'intérêt de rechercher des matériaux qui deviennent supraconducteurs à des températures plus élevées. Dans cette quête des « hautes températures », le record était – avant l'avancée de l'équipe allemande – de -109 °C pour des matériaux « non conventionnels », comme les cuprates, à base de cuivre.

Comment Mikhail Eremets et ses collègues ont-ils réussi leur tour de force ? « *La supraconductivité de l'hydrogène et de ses composés intéresse les spécialistes depuis les années 1970* », explique Nicolas Bergeal, de l'École supérieure de physique et de chimie

▼ Dans une cellule à enclume de diamant, on injecte du sulfure d'hydrogène gazeux que l'on refroidit ensuite jusqu'à -73 °C (200 kelvins). La pression qui s'exerce entre les deux diamants transforme le sulfure d'hydrogène en un solide dont les physiciens ont pu vérifier qu'il était supraconducteur.



Infographie : Bruno Bourgeois



▲ *Cette image illustre l'effet Meissner, qui permet à un aimant de léviter sur un supraconducteur par expulsion du champ magnétique.*

industrielles de la ville de Paris. L'hydrogène possède en effet une caractéristique très intéressante : il s'agit d'un gaz très léger. « *Or certains physiciens estiment que, si l'hydrogène ou l'un de ses composés pouvait devenir métallique à très haute pression, ses atomes vibreraient à des fréquences très élevées,* reprend Nicolas Bergeal. *Les vibrations produiraient alors beaucoup d'énergie, qui permettrait de maintenir le matériau dans un état supraconducteur à une température relativement élevée.* »

Il a fallu plus de quarante ans pour vérifier cette prédiction. L'équipe de l'Institut Max-Planck a inséré du sulfure d'hydrogène, sous forme gazeuse, dans une cellule à enclumes de diamant. Ce dispositif, d'à peine un centimètre cube, se compose de deux diamants dont les pointes sont orientées l'une vers l'autre. Puis les physiciens ont refroidi l'intérieur de la cellule à environ -73 °C – ce qui a permis de liquéfier le sulfure d'hydrogène – et fait varier la pression entre les diamants. Ils ont établi que, autour de 150 gigapascals (GPa) – « *un niveau de pression colossal* », selon Nicolas Bergeal –, leur matériau se solidifie, et présente toutes les caractéristiques d'un supraconducteur : une résistance électrique nulle. De plus, ils ont aussi mis en évidence sur leur échantillon une seconde propriété des matériaux supraconducteurs : l'expulsion du champ magnétique, baptisée effet Meissner, qui permet à un aimant de léviter sur un supraconducteur.

PRESSION ATMOSPHÉRIQUE

« *Il s'agit d'un très joli travail expérimental,* commente le physicien parisien. *L'un des points qui reste à éclaircir est celui de la nature de la phase étudiée. En effet, dans cette expérience, ils n'ont aucun moyen de savoir quelle est la structure du solide qu'ils obtiennent à des pressions aussi fortes.* » Ils suggèrent tout de même que, lors de la phase supraconductrice, le sulfure d'hydrogène se transformerait en un composé chimique plus complexe.

Ce résultat demande encore à être reproduit de manière indépendante, avant de pouvoir être validé. Des équipes du monde entier s'y attellent. Celle de Katsuya Shimizu, à l'université d'Osaka, au Japon, est en pointe. « *Nous avons déjà confirmé la résistance nulle,* confie le physicien japonais. *Il nous reste à confirmer l'effet Meissner. Or, comme l'échantillon est très petit et les niveaux de pression monumentaux, c'est extrêmement difficile.* »

En filigrane, les physiciens, excités par cette percée, espèrent améliorer le record. En remplaçant une partie du sulfure d'hydrogène par du phosphore, certains estiment que l'on pourrait dépasser la température ambiante, mais à condition d'augmenter encore la pression… La révolution de la supraconductivité à température ambiante et à pression atmosphérique n'est pas pour tout de suite.

Vincent Glavieux

(1) A.P. Drozdov *et al., Nature,* doi:10.1038/nature14964, 2015.

Pour en savoir plus

■ Vincent Glavieux, « De la colle magnétique pour les paires d'électrons », *La Recherche,* juin 2012, p. 14.

KIYOSHI TAKAHASE SEGUNDO/PHOTO12/ALAMY

Des massacres déjà fréquents au Néolithique

En Allemagne, l'analyse d'os retrouvés dans une fosse commune renforce l'idée selon laquelle un climat de violence régnait au début du Néolithique.

5600 À 4900 AV. J.-C

INDICATEUR

CETTE PÉRIODE correspond à la culture dite « rubanée », ou « à céramique linéaire », caractérisée par la migration de peuples d'agriculteurs en Europe centrale.

Des ossements vieux de 7 000 ans retrouvés en 2006 dans la fosse commune Schöneck-Kilianstädten, en Allemagne, viennent d'être analysés. Ils appartiendraient à au moins vingt-six représentants de la culture rubanée, les premiers agriculteurs à s'être installés en Europe centrale au début du Néolithique. L'équipe internationale d'archéologues qui s'est chargée de les examiner a relevé des fractures anormales au niveau du crâne et des membres inférieurs, témoignant d'un massacre (1). L'arme du crime ? Une sorte de hache en pierre polie, selon les auteurs. Un outil que les premiers agriculteurs utilisaient pour la découpe du bois et, le cas échéant, comme arme. Cet épisode de violence collective n'est pas un fait isolé. Deux autres fosses de la même époque avaient été mises au jour dans les années 1980 à Talheim, en Allemagne, et à Asparn, en Autriche.

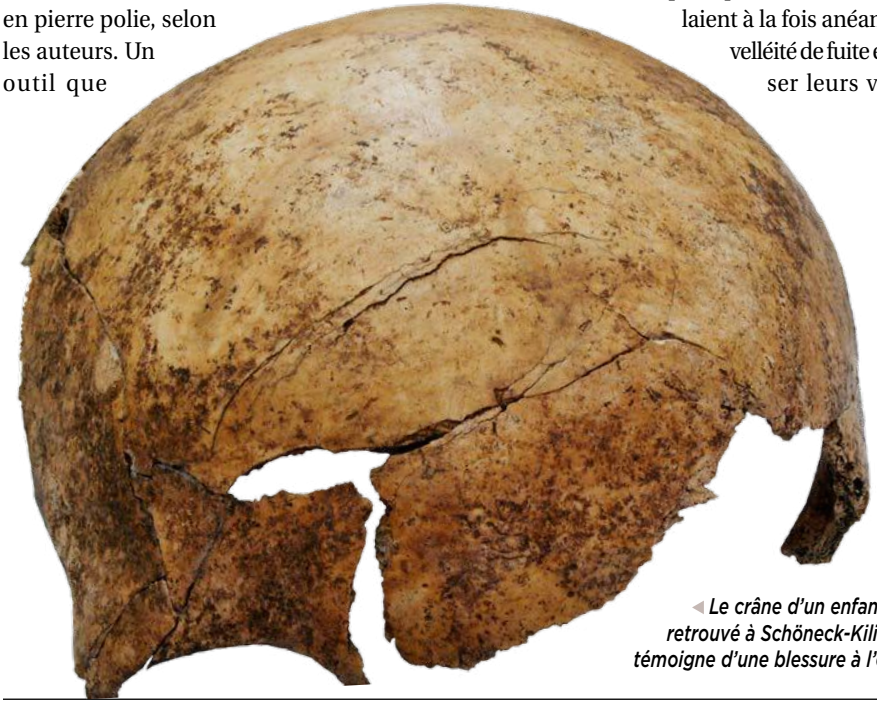
PÉRIODES DE PÉNURIE

Dans ces fosses, comme dans celle de Schöneck-Kilianstädten, des squelettes aux os fracturés avaient été retrouvés dans des dispositions désorganisées indiquant l'absence de rites funéraires. Or, dans la culture rubanée, les morts étaient pour la plupart inhumés de façon individuelle, et leurs corps disposés dans une position fœtale, sur le flanc gauche, la tête orientée vers l'est. Ils étaient enterrés avec des ornements, en particulier des coquillages et des poteries. Les victimes exhumées dans les trois fosses néolithiques n'ont pas eu droit à ces égards.

À Schöneck-Kilianstädten, en particulier, les membres inférieurs des victimes ont été systématiquement brisés. Par cette pratique, les bourreaux voulaient à la fois anéantir toute velléité de fuite et terroriser leurs victimes, s'ils ne les avaient pas déjà tuées. L'analyse de cette troisième fosse commune nourrit la thèse selon laquelle les épisodes de violence collective étaient fréquents à la fin de la période de la culture rubanée. « *Cela illustre de façon saisissante la violence collective qui existe à la Préhistoire, et en particulier à la fin du Néolithique ancien,* commente Anthony Denaire, archéologue spécialiste du Néolithique, à l'université de Strasbourg. *Les groupes humains n'ont pas attendu l'arrivée des métaux et l'émergence de la Protohistoire puis de l'Histoire pour que la guerre et ses horribles corollaires s'épanouissent pleinement.* »

Mais comment expliquer ces violences ? D'après les auteurs, la baisse de la production agricole et la raréfaction des ressources liées à une période de sécheresse auraient mené à des tensions sociales importantes puis à des tueries.

Gautier Cariou



CHRISTIAN MEYER

◀ *Le crâne d'un enfant de 8 ans retrouvé à Schöneck-Kilianstädten témoigne d'une blessure à l'os frontal.*

(1) C. Meyer *et al., PNAS,* doi :10.1073/pnas.1504365112, 2015.

« Une mutation génétique réactive le programme de différenciation des cellules »

Des cancérologues ont révélé l'étrange destin des cellules du sein : soumises à une mutation particulière, elles deviennent capables de produire des cellules d'un type différent du leur.

La Recherche. **Une équipe belge et australienne vient de lever le voile sur l'origine de l'hétérogénéité des tumeurs induites par la mutation d'un gène impliqué dans 30 % des cancers du sein (1). En quoi est-ce une découverte importante ?**

Jean Feunteun. Il est fondamental de comprendre pourquoi des cellules différentes coexistent dans une même tumeur, et déterminer dans quelle mesure cette hétérogénéité influence le pronostic de la maladie. Ce travail, qui vient d'être corroboré par une autre étude suisse et américaine (2), apporte une réponse qui renverse le dogme existant.

Quel était ce dogme ?

Schématiquement, le tissu d'une glande mammaire se compose de deux types de cellules, les cellules luminales, qui produisent le lait, et les cellules basales, capables de se contracter pour assurer la sécrétion. Jusqu'à présent, on pensait qu'une mutation se produisant dans une cellule luminale aboutissait à la formation d'une tumeur composée majoritairement de cellules cancéreuses luminales. De même, une mutation dans une cellule basale aboutissait à une tumeur composée de cellules cancéreuses basales.

L'étude belge démontre que ce n'est pas ce qui se produit ?

En effet, l'équipe de Cédric Blanpain, à l'université libre de Belgique, a utilisé des souris génétiquement modifiées, chez lesquelles il est possible d'activer précisément l'expression d'une forme mutée du gène PIK3CA, impliquée dans de nombreux cancers du sein. Ils ont ainsi observé que l'expression de la mutation PIK3CA donne à la cellule où elle se produit la capacité de produire différents types de cellules. Autrement dit, cette mutation chez une cellule bien différenciée réactive chez celle-ci un programme de dé-différenciation qui lui procure des capacités un peu identiques à celles d'une cellule souche pluripotente. Ainsi, si la mutation se produit dans une cellule basale, elle devient capable de produire aussi bien des lignées de cellules basales que des cellules luminales.

> « COMPRENDRE LES MÉCANISMES MOLÉCULAIRES EST FONDAMENTAL POUR DÉCOUVRIR DE NOUVELLES THÉRAPIES »

Est-ce que la cellule d'origine où se produit la mutation influence la composition de la tumeur et le pronostic ?

Oui, de façon surprenante, la mutation du gène PIK3CA dans des cellules basales mène au développement de tumeurs luminales, alors que cette mutation dans les cellules luminales conduit à des tumeurs plus agressives, notamment de type basale.

Ces découvertes auront-elles des applications thérapeutiques ?

Dans l'immédiat, ce travail qui identifie la signature moléculaire des cellules subissant cette reprogrammation permettra d'affiner le diagnostic et le pronostic des malades. Mais la compréhension des mécanismes génétiques et moléculaires, de la cellule d'origine jusqu'à la tumeur invasive, permettra de découvrir de nouvelles cibles thérapeutiques. On peut aussi penser que cette reprogrammation génétique d'une cellule différenciée induite par un oncogène (*) entre en jeu dans d'autres cancers.

Propos recueillis par Mathias Germain

(1) A. V. Keymeulen *et al.*, *Nature*, doi : 10.1038/nature14665, 2015.
(2) S. Koren *et al.*, *Nature*, doi : 10.1038/nature14669, 2015.

▲ *Jean Feunteun, généticien, oncologue.*

DR

SES DATES

1973 : doctorat de biologie moléculaire.
1995-2010 : direction de la recherche à l'Institut Gustave-Roussy, Villejuif.
2008 : chercheur à l'unité mixte de recherche 8200 « Stabilité génétique et oncogénèse ».
2013 : professeur émérite, université Paris-Sud.

(*) **Un oncogène** est un gène dont l'expression favorise la survenue d'un cancer.

La Californie s'enfonce

Le réchauffement climatique est en partie responsable de la sécheresse qui frappe la Californie. Avec des conséquences aussi désastreuses qu'inquiétantes.

5 cm PAR MOIS

INDICATEUR

C'EST L'AFFAISSEMENT DU SOL mesuré dans certains points de la vallée San Joaquin en Californie, à partir de deux images satellite et de cartes aériennes.

Depuis 2011, la Californie traverse l'une des pires sécheresses de son histoire. Et l'homme n'y est sans doute pas pour rien, affirme une équipe de l'université Columbia, aux États-Unis (1). À partir de données climatiques issues de 24 000 points de mesure, elle a estimé l'humidité du sol chaque mois depuis 1901. Puis, grâce à une série de calculs, elle a déterminé quelle aurait été la sévérité de la sécheresse récente sans la tendance au réchauffement sur le long terme.

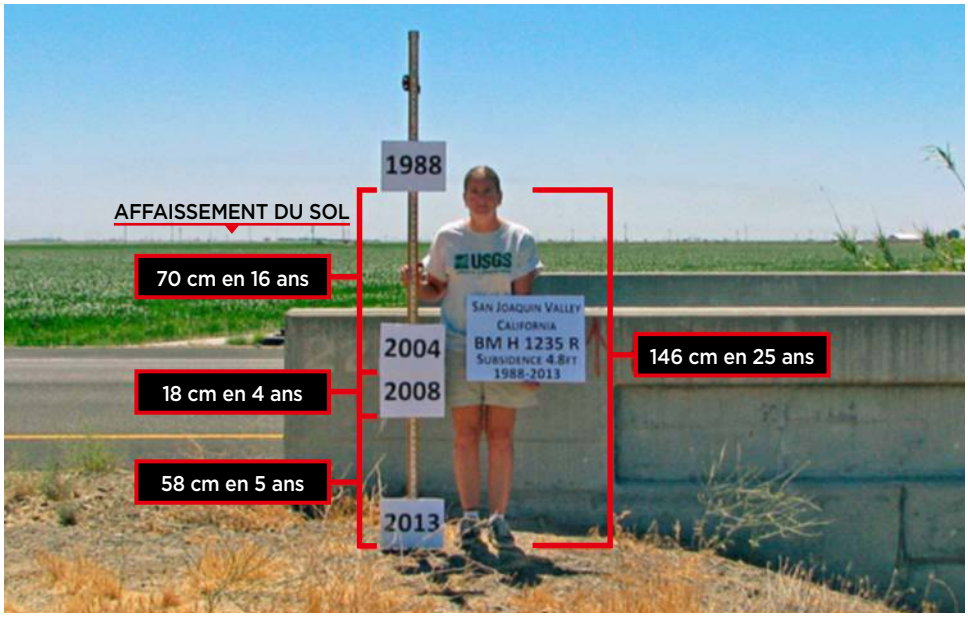
Résultat : si les variations de précipitation sont bien la cause principale de la sécheresse entre 2012 et 2014, le réchauffement climatique a aussi une responsabilité non négligeable : de 8 à 27 % entre 2012 et 2014, et de 5 à 18 % seulement pour l'année 2014. « *En effet, nous avons constaté que le réchauffement asséchait l'atmosphère et augmentait donc sa capacité à absorber l'humidité du sol, asséchant plus rapidement des sols déjà secs* », explique Park Williams, coauteur de l'étude.

POMPAGE INTENSIF

Sur le terrain, les conséquences de cette sécheresse sont en tout cas de plus en plus visibles : en huit mois, le sol de l'ancien lac Tulare, situé au sud de la vallée San Joaquin, s'est affaissé de 30 centimètres, soit une moyenne de 4 centimètres par mois. Dans d'autres endroits de cette même vallée, cet affaissement atteint parfois 5 centimètres par mois. C'est ce qu'ont constaté des chercheurs du Jet Propulsion Laboratory de la Nasa (2), grâce à des images provenant de deux satellites et à des cartes radar aériennes. « *Nous avons découvert que la vitesse d'abaissement du sol a augmenté entre 2006 et le début de 2015* », indique Tom Farr, coauteur du rapport.

En cause : l'augmentation du pompage de l'eau des nappes phréatiques, due à la sécheresse. « *D'autant que, dans le même temps, il y a très peu d'eau de surface (provenant de la pluie ou de la fonte des neiges) qui va réapprovisionner les nappes phréatiques* », explique Tom Farr, qui précise que ces affaissements ont lieu sur des sites où les couches souterraines ont davantage tendance à se tasser, aggravant l'affaissement. Le risque : l'effondrement d'importantes infrastructures comme l'aqueduc de Californie, qui alimente en eau de nombreuses zones de la région, notamment la ville de Los Angeles.

Bérénice Robert



L'affaissement du sol se produit en Californie depuis plusieurs décennies. Cependant, le phénomène s'est accéléré ces dernières années, augmentant les risques de dommages sur les infrastructures.

USGS/JUSTIN BRANDT

(1) A. P. Williams *et al.*, *Geo. Phys. Lett.*, doi: 10.1002/2015GL064924, 2015.
(2) T. Farr *et al.*, « Progress report : subsidence in the Central Valley », Nasa, 2015.

L'antimatière nous échappe encore

Deux expériences du Cern confirment l'équivalence entre matière et antimatière.

Le mystère de l'antimatière s'épaissit. Deux expériences réalisées au Cern confirment avec une précision jamais atteinte que matière et antimatière sont équivalentes. Ce qui n'est pas sans poser problème. Au début de l'Univers, lors du Big Bang, autant de matière que d'antimatière ont été créées. Or quand matière et antimatière se rencontrent, elles s'annihilent. Du coup, s'il reste de la matière aujourd'hui – celle qui nous constitue ainsi que tout l'Univers observable –, c'est qu'il doit exister une différence entre les deux, appelée asymétrie par les physiciens. Ces expériences montrent que cette asymétrie nous échappe encore…

Comment les physiciens ont-ils procédé ? Toute particule possède son équivalent d'antimatière, avec pour seule différence une charge électrique opposée (un électron porte une charge négative et l'antiélectron une charge positive par exemple). Mais l'antimatière est difficile à produire en laboratoire et comme elle s'annihile quand elle rencontre de la matière, difficile à confiner.

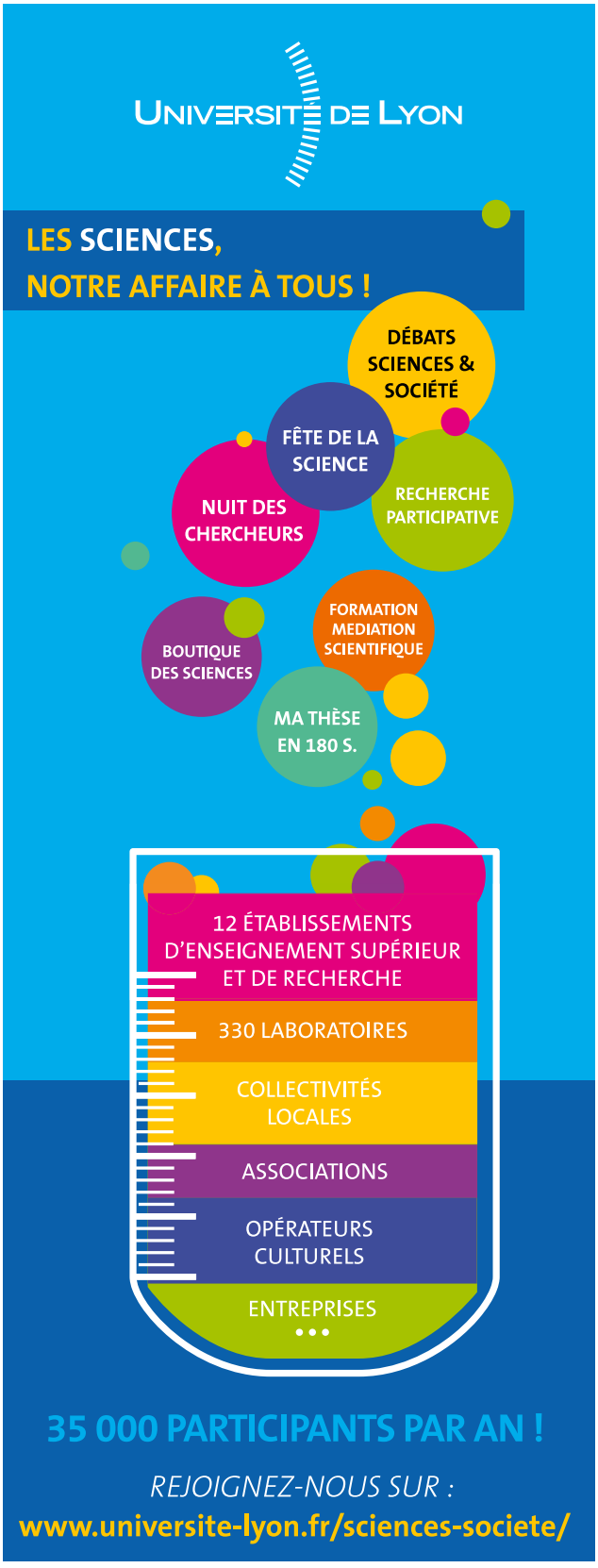
La première expérience utilise un excellent piège à antiprotons. Le vide qui y règne est si bon qu'un antiproton reste confiné pendant un an sans heurter les parois du piège ou un atome de gaz résiduel. Les mesures sont ainsi plus longues et plus précises. La collaboration internationale Base a ainsi pu comparer le rapport charge/masse pour des protons et des antiprotons. Résultat : ce rapport est identique pour la particule de matière et son équivalent d'antimatière à 69 parties pour mille milliards (1). *« Le fait qu'on n'était pas parvenu à améliorer cette mesure pendant vingt ans en dit long sur sa difficulté »*, commente Michael Doser, physicien au Cern.

NOYAUX LÉGERS

La seconde expérience, effectuée à l'aide du détecteur Alice du Cern, permet de comparer des noyaux légers. La formation d'antinoyaux est un phénomène rare, et il a fallu toute la puissance du Grand Collisionneur du Cern pour produire suffisamment d'antinoyaux de deutérium et d'hélium 3. Là encore, les mesures indiquent que noyaux et antinoyaux ont une masse identique, et que les forces qui lient ces particules à l'intérieur des noyaux et des antinoyaux sont identiques (2).

Philippe Pajot

(1) S. Ulmer *et al.*, *Nature*, *524*, 196, 2015.
(2) Collaboration Alice, *Nature Physics*, doi : 10.1038/NPHYS3432, 2015.



Une molécule pour effacer l'addiction ?

Un mécanisme permettrait d'effacer spécifiquement la mémoire associée à la prise de drogue. Un espoir pour aider au sevrage des toxicomanes et à leur réhabilitation.

C'EST LE NOMBRE D'INDIVIDUS DANS LE MONDE qui souffrent de troubles liés à l'usage de drogues ou de toxicomanie.
Rapport ONUDC 2015

Comment se sevrer d'une drogue ? En arrêtant de consommer la substance, mais pas seulement : le moindre élément du contexte de la prise (matériel, lieu, ambiance…) peut en déclencher le souvenir et faire rechuter une personne sobre. D'où l'idée de l'équipe d'Erica Young, de l'Institut Scripps en Californie, d'effacer spécifiquement cette mémoire contextuelle. Elle a identifié une molécule qui, injectée chez le rat, efface les souvenirs liés à l'usage de méthamphétamine (METH) et évite la rechute (1).

Les chercheurs se sont attaqués au support physique de la mémoire : la zone de connexion entre les neurones, ou synapse. Lorsque nous vivons une expérience, de nouvelles synapses apparaissent dans le cerveau. Elles se forment par un changement de configuration de l'architecture cellulaire, appelée cytosquelette. Cela implique deux molécules : l'actine, une molécule simple dont les exemplaires se polymérisent, c'est-à-dire se combinent, en filaments en quelques secondes ; et la myosine avec laquelle l'actine polymérisée interagit pour former une structure stable. Une fois cette structure formée, le cytosquelette se fige et la mémoire est stockée.

LE MÉCANISME D'INHIBITION QUI A ÉTÉ DÉCOUVERT EST SPÉCIFIQUE DE LA MÉMOIRE LIÉE À LA MÉTHAMPHÉTAMINE

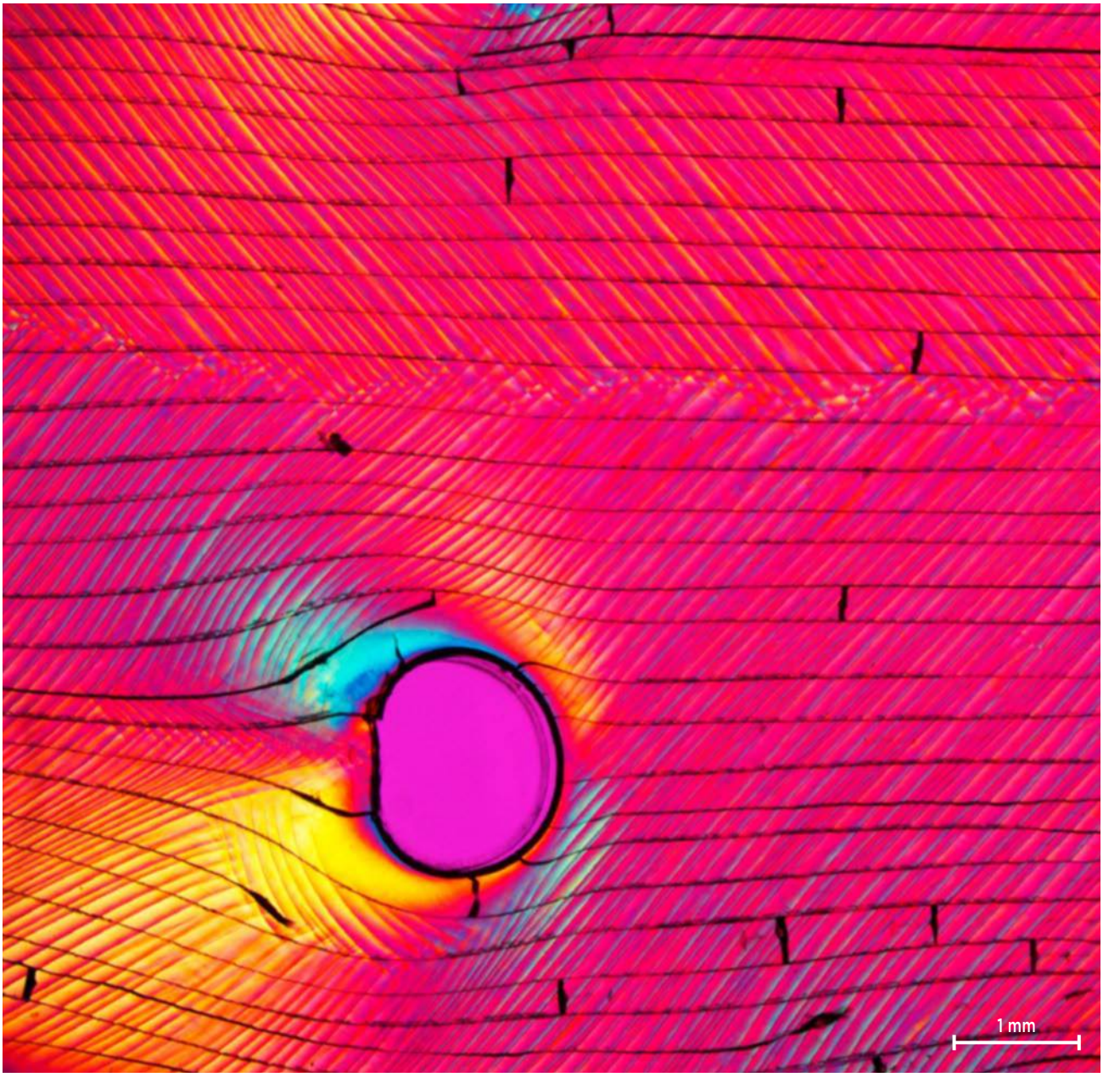
Or selon les chercheurs, lors de la prise de méthamphétamine, l'actine polymérisée reste dynamique bien plus longtemps que d'habitude, rendant la mémoire associée vulnérable. En 2014, Erica Young et son équipe ont ainsi montré qu'en dépolymérisant l'actine dans l'amygdale, une région du cerveau associée aux émotions, elle pouvait faire disparaître les souvenirs associés à la METH, sans affecter les autres types de mémoire (2). Pour Marcello Solinas, de l'équipe neurobiologie et neuropharmacologie de l'addiction à l'université de Poitiers, *« le fait que ce mécanisme soit spécifique de la mémoire liée à la méthamphétamine, et n'affecte pas celle liée à la peur, par exemple, est remarquable, bien que surprenant, et devra être confirmé par des expériences répliquant les résultats »*.

Les scientifiques ont, depuis, cherché une cible thérapeutique plus intéressante que l'actine. Car l'inhibition de l'actine pose problème : celle-ci est présente dans toutes les cellules de l'organisme et joue un rôle dans de nombreux mécanismes (contraction musculaire, création et maintien des structures cytosquelettiques). L'équipe déclare à présent avoir trouvé un mécanisme d'inhibition agissant cette fois sur une myosine particulière (NMIIB), impliquée dans la polymérisation de l'actine lors de la formation de la mémoire.

En injectant un inhibiteur de cette NMIIB chez des rats consommateurs de méthamphétamine et en sevrage, les biologistes ont constaté un taux de rechute significativement moindre sur une durée d'au moins trente jours, malgré la présentation d'un contexte rappelant la prise de drogue. Cette molécule a en plus l'avantage de pouvoir être injectée dans le sang plutôt que dans le cerveau, ce qui n'est pas le cas de celles testées jusqu'ici. Jacqueline Scuvée-Moreau, pharmacologue à l'université de Liège, met cependant en garde contre la toxicité potentielle de l'inhibiteur utilisé, la NMIIB étant également présente dans d'autres types cellulaires que les neurones, avec d'autres fonctions. La piste thérapeutique est donc prometteuse, mais sans doute pas applicable en clinique pour le moment.

Aline Aurias

(1) E. Young *et al., Mol. Psychiatry,* doi:10.1038/mp.2015.103, 2015.
(2) E. Young *et al., Biol. Psychiatry, 75,* 96, 2014.



L.GOEHRING - P. C. KIATKIRAKAJORN/ MPI

Chevrons de séchage

Peintures, encres, enrobages… tous ces liquides contenant des particules en suspension sont des colloïdes. La compréhension du séchage des couches de ces fluides complexes intéresse grandement les industriels. Comment expliquer par exemple une des caractéristiques de ce séchage : l'apparition de bandes en chevron telles que l'on peut les voir sur cette image en lumière polarisée ? Pour le savoir, des physiciens allemands ont étudié des colloïdes formés de particules de plastique et de silice dispersés dans l'eau (1). En variant les paramètres lors d'expériences de séchage, ils ont observé que l'évaporation à travers le colloïde fait passer l'eau à travers la couche, du côté liquide vers le côté solide, ce qui comprime les particules contre le solide et entraîne un cisaillement qui aboutit à la formation des bandes. **Philippe Pajot**

(1) P.-C. Kiatkirakajorn et L. Goehring, *Phys. Rev. Lett., 115,* 088302, 2015.

L'édito par Sophie Coisne

Rédactrice en chef

Une nouvelle vie

« *Nous avons l'obligation éthique de réagir violemment à la banalisation de l'idéologie transhumaniste.* » C'est par ces mots que trois médecins et chercheurs français terminent leur tribune dans *La Recherche* (p. 84). François Berger, Franck Lethimonnier et François Sigaux s'opposent à l'usage des technologies proposé par le transhumanisme, ce mouvement dont l'objectif est de transformer l'homme en « posthumain » dopé aux implants rétiniens, cérébraux et aux objets connectés.

INNOVATIONS. Nos trois signataires ne sont pas technophobes. François Berger dirige un institut qui développe des implants cérébraux et des interfaces cerveau-machine. Franck Lethimonnier coordonne des recherches sur les technologies pour la santé. Quant à François Sigaux, c'est un spécialiste de l'innovation en cancérologie. Pour autant, ils s'inquiètent que des interventions technologiques guidées par des intentions mercantiles et dénuées de tout contrôle médical puissent être menées sur l'homme en bonne santé.

RÉFLEXIONS. Ce débat a déjà été lancé aux États-Unis : en début d'année, l'Agence de réglementation américaine des produits alimentaires et pharmaceutiques (FDA) a diffusé un projet de guide de bonnes pratiques à destination des industriels fabriquant des objets connectés liés à la santé – ceux-là même qui promettent à leur propriétaire de perdre du poids, d'améliorer leur santé cardio-vasculaire ou de retrouver le sommeil en suivant un protocole sans avis médical. En Europe, la réflexion à ce sujet commence à peine. Une réglementation est en discussion, une réflexion éthique également. C'est donc le moment, pour *La Recherche,* de mettre le débat sur la table. Oui ou non, les technologies actuelles peuvent-elles permettre d'améliorer l'homme ? Sommes-nous prêts à l'accepter ? Sommes-nous des transhumanistes qui s'ignorent ?

> **« Sommes-nous des transhumanistes qui s'ignorent ? »**

ENJEUX. C'est parce que les questions à l'interface de la science et de la société sont nombreuses que nous avons souhaité ouvrir plus largement nos pages aux débats. Dans cette nouvelle formule de *La Recherche,* chers lecteurs et lectrices, vous trouverez désormais une partie Idées étoffée, dans laquelle scientifiques, philosophes, spécialistes de l'éthique… analysent les enjeux actuels, s'engagent, se confrontent. N'hésitez pas à réagir à leurs propos par courrier ou sur Facebook.

La Recherche SOPHIA PUBLICATIONS : 8, rue d'Aboukir 75002 Paris. Tél. : 01 70 98 19 19 • **e-mail rédaction :** courrier@larecherche.fr • Pour joindre directement par téléphone un membre de la rédaction, composez le 01 70 98, suivi des quatre chiffres placés après son nom. Par mail, libellez l'adresse sur le modèle : initiale du prénom suivi du nom@sophiapublications.fr (sans accents).

La Recherche est publiée par Sophia Publications, filiale de Sophia Communications • **Président directeur-général et directeur de la publication :** Thierry Verret • **Directeur éditorial :** Maurice Szafran • **Directeur délégué :** Jean-Claude Rossignol • **Secrétaire général :** Louis Perdriel • **Assistante de direction :** Gabrielle Monrose *(19 06)* • **ABONNEMENTS : Tarif France :** 1 an 10 nos + 1 n° double 67 euros. 1 an 10 nos + 1 n° double + 4 hors-séries 89 euros. • **Tarif international :** nous contacter. Tél. : 01 55 56 71 15. 00 (33) 1 55 56 71 15. E-mail : abo.recherche@biwing.fr. Adresse : Service abonnements *La Recherche,* 4 rue de Mouchy 60438 Noailles Cedex • **Suisse :** Edigroup. Tél. : (0041) 22 860 84 01 • **Belgique :** Edigroup. Tél. : (0032) 70 233 304 • Achat de revues et d'écrins *La Recherche* – BP65 - 24, chemin latéral 45390 Puiseaux. Tél. : 02 38 33 42 89 • **Rédactrice en chef :** Sophie Coisne • **Rédactrice en chef technique :** Catherine Caltaux • **Conception graphique :** Dominique Pasquet • **Assistante :** Gabrielle Monrose *(19 06)* • **Chef des informations :** Philippe Pajot *(19 29)* • **Chefs de rubrique :** Hervé Cabibbo *(19 30)*, Mathias Germain *(19 33)* • **Rédacteurs :** Gautier Cariou *(19 31)*, Vincent Glavieux *(19 32)*, Bérénice Robert *(19 34)* • **1re rédactrice graphiste :** Michèle Bourgeois *(19 27)* • **Service photo :** Claire Balladur *(19 41)* • **Secrétaire de rédaction :** Véronique Fuvel *(19 36)* • **Ont collaboré à ce numéro :** Antoine Cappelle, Maryvonne Marconville • **Responsable fabrication :** Christophe Perrusson *(19 10)* • **Activités numériques :** Bertrand Clare *(19 08)* • **Ressources humaines :** Agnès Cavanié *(19 71)* • **Communication :** Florence Virlois *(19 21)* • **Directeur des ventes et promotion :** Valéry-Sébastien Sourieau *(19 11)* • **Vente messageries VIP-diffusion :** Frédéric Vinot • numéro vert 0800 51 49 74 **Responsable gestion abonnements :** Isabelle Parez *(19 12)* • **Responsable du marketing direct :** Linda Pain *(19 14)* • **Responsable comptabilité :** Karima Merimi *(19 18)* • **Comptabilité :** Teddy Merle *(19 15)* • **Diffusion librairies :** DIF'POP'. Tél. : 01 43 62 08 07 Fax : 01 43 62 07 42 • **Régie publicitaire : Médiaobs.** Pour joindre directement une personne, composez le 01 44 88, suivi des quatre chiffres placés après son nom. • **Directrice générale :** Corinne Rougé • **Directeur commercial :** Jean-Benoît Robert • **Directeur des marchés Marketing direct :** Xavier Personnaz • **Assistante commerciale :** Marylin Raso *(89 02)* • **Directeur du pôle Sciences :** Sylvain Mortreuil *(97 75)* • **Directrice de clientèle :** Karine Grossman *(89 08)* • **Imprimerie :** G. Canale & C., Via Liguria 24, 10071 Borgaro (TO), Italie. Dépôt légal à parution.

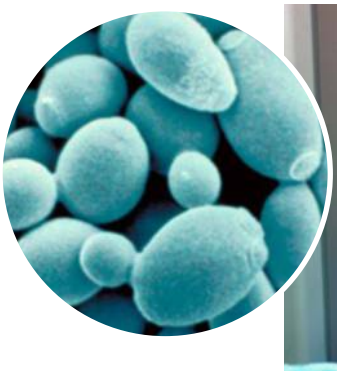
Les titres, les intertitres, les textes de présentation et les légendes sont établis par la rédaction du mensuel. La loi du 11 mars 1957 interdit les copies ou reproductions destinées à une utilisation collective. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur, ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite (article L.122-4 du Code de propriété intellectuelle). Toute copie doit avoir l'accord du Centre français du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris. Tél. : 01 44 07 47 70. Fax : 01 46 34 67 19). L'éditeur s'autorise à refuser toute insertion qui semblerait contraire aux intérêts moraux ou matériels de la publication. Commission paritaire : 0919 K 85863. ISSN 0029-5671

© Gil Lefauconnier

Des opioïdes produits à partir de levures

En modifiant profondément le génome de levures, une équipe américaine leur a fait produire des opioïdes à partir de sucre. Prochaine étape : améliorer les rendements encore trop faibles.

Morphine et codéine ont été déclarés *« médicaments essentiels »* par l'Organisation mondiale de la santé dans la prise en charge des douleurs sévères. Leur production repose sur la culture du pavot (*Papaver somniferium*, « pavot à opium ») , car ils sont trop complexes pour être synthétisés en laboratoire. Pas étonnant donc que l'annonce, cet été, de la mise au point d'une souche de levures capable de reproduire toute la chaîne de fabrication d'un opioïde à partir du glucose ait créé une certaine agitation. Le sujet était d'ailleurs l'objet d'une course entre plusieurs équipes anglo-saxonnes.



▸ *À l'université Stanford, en Californie, le premier opioïde de synthèse a été obtenu à partir de glucose dans ce fermentateur, en utilisant une levure modifiée génétiquement (en médaillon).*

Chacune n'était jusque-là parvenue à reproduire qu'une partie de cette biosynthèse. En avril, à l'université Concordia de Montréal, une levure dotée de gènes de pavot reproduisait la fin de la chaîne, celle qui conduit d'un composé intermédiaire appelé R-reticuline à la morphine (1). En mai, une équipe de l'université de Berkeley, en Californie, et de l'université Concordia élaborait une levure capable de réaliser la première partie de la chaîne : la transformation du glucose en S-reticuline (2). Restait à trouver l'enzyme capable de convertir la R-reticuline en S-reticuline. Cela fut fait par les deux équipes en juin.

Mais dès août, Christina Smolke et ses collaborateurs, de l'université Stanford, en Californie, ont présenté un micro-organisme capable de conduire toute la chaîne de synthèse (3). Ce qui leur a permis d'obtenir de l'hydrocodone, un opioïde analgésique et antitussif commercialisé en Amérique du Nord sous le nom de Vicodin.

23 GÈNES INSÉRÉS

Pour que leur levure soit capable d'une telle prouesse, il a fallu lui permettre de fabriquer les enzymes nécessaires à cette synthèse complexe. L'équipe a inséré dans le génome du micro-organisme pas moins de 23 gènes codant ces enzymes. Et quels gènes ! Certains sont des gènes de levure modifiés pour s'exprimer plus ou moins intensément que d'habitude, d'autres sont issus de bactéries, d'autre encore de plantes (dont le pavot) et même de rat. La conversion de la S-reticuline en R-reticuline est notamment réalisée grâce à une enzyme végétale.

Les rendements obtenus – de l'ordre de 0,3 microgramme d'hydrocodone par litre de culture – sont encore faibles, et les auteurs estiment qu'il faudrait les multiplier par 100 000 pour que ce mode de synthèse concurrence la culture du pavot. Ces travaux ouvrent néanmoins la voie à la production de ces analgésiques en laboratoire, s'affranchissant des contraintes de la culture du pavot. À terme, il s'agit aussi de pallier la pénurie de morphine dans les pays en voie de développement, où le nombre de personnes nécessitant des opiacés sans y avoir accès s'élèverait à près de 5,5 milliards. **Martin Tiano**

(1) V. Martin *et al., PloS One,* 10(4): e0124459, 2015.
(2) W. DeLoache *et al., Nature chemical biology,* 11, 465, 2015.
(3) S. Galanie *et al., Science,* DOI: 10.1126/science.aac9373, 2015.

STEPHANIE GALANIE - SCIMAT / BSIP

par Roger Mansuy*

Phénomènes universels dans un jeu de Puissance 4

Désœuvré, vous commencez à glisser des jetons dans la grille d'un jeu de Puissance 4 : vous prenez un jeton, puis le glissez dans une colonne choisie au hasard et recommencez… Chaque colonne se remplit petit à petit en fonction du nombre de jetons joués. Si l'on suppose la grille assez grande, on peut se demander quelle hauteur sera atteinte au bout d'un temps « long ». La loi des grands nombres indique que la hauteur dans une colonne donnée est proportionnelle au nombre de jetons glissés dans la grille. Plus précisément, la hauteur d'une colonne divisée par le nombre total de jetons tend asymptotiquement vers la probabilité de mettre un jeton dans cette colonne-là.

UN AUTRE RÉSULTAT de probabilité, le théorème central limite, décrit la variation de la hauteur autour de cette valeur moyenne comme approximativement gaussienne : visuellement, un histogramme des hauteurs des colonnes ressemblera à la courbe en cloche, étudiée par Gauss, centrée sur la valeur moyenne. L'ordre de grandeur des variations est alors la racine carrée du nombre de jetons joués. Recommençons cette expérience avec un jeu de Puissance 4 un peu poisseux : au lieu de glisser jusqu'en bas de la colonne, un jeton s'immobilise dès qu'il est en contact avec un autre jeton (en dessous de lui ou à ses côtés). Quelle est désormais la hauteur moyenne d'une colonne ? Peut-on estimer l'écart à cette valeur moyenne ?

CETTE SITUATION est loin d'être artificielle : on peut l'admirer dans le lent mouvement des flocons de neige glissant le long d'un pare-brise en hiver. Les mathématiciens, peut-être un peu moins poètes, lui ont donné le nom de modèle de déposition balistique. L'étude théorique est assez complexe et il faut être davantage précis dans notre protocole pour obtenir des résultats : on suppose que l'intervalle entre deux dépôts de jetons dans une colonne donnée est aléatoire suivant une loi exponentielle (si ce mot vous effraie, comprendre qu'il s'agit juste d'une façon de préciser l'aléa) et indépendant des autres temps entre dépôts. Dans ce cadre, on a établi que la hauteur moyenne est à nouveau proportionnelle au nombre de jetons placés (donc au temps de jeu). Par ailleurs, on suppose – cela n'a pas encore été démontré – que les écarts par rapport à la hauteur moyenne, qui sont désormais de l'ordre de la racine cubique du temps, suivent la loi de Tracy-Widom. Il s'agit d'une loi statistique établie dans les années 1990 qui apparaît dans des contextes différents, comme la croissance aléatoire des cristaux, mais aussi dans la physique des transitions de phase. Cette loi fait partie d'une nouvelle classe universelle de problèmes baptisés KPZ.

> « ON PEUT ADMIRER CETTE SITUATION DANS LE LENT MOUVEMENT DES FLOCONS DE NEIGE GLISSANT LE LONG D'UN PARE-BRISE EN HIVER »

LA CLASSE UNIVERSELLE KPZ apparaît naturellement dans des situations où il y a des corrélations spatiales. C'est donc la dépendance entre les colonnes (évidente dans notre jeu de Puissance 4 poisseux puisqu'une colonne bien remplie aura des colonnes voisines bien remplies avec grande probabilité) qui fait basculer d'un comportement à un autre. Reste que l'universalité de ce comportement n'est pas encore comprise complètement. En 1809, la démonstration du théorème central limite expliquait pourquoi les lois gaussiennes apparaissent dès lors qu'il y a indépendance. Les mathématiciens cherchent encore un résultat analogue pour la classe KPZ. ■

* **Roger Mansuy,** professeur au lycée Louis-le-Grand, à Paris, nous raconte, chaque mois, un thème mathématique inspiré par un exposé grand public qui a lieu régulièrement à l'Institut Henri-Poincaré.

*Retrouvez la conférence d'**Ivan Corwin** sur ce thème : http://tinyurl.com/ivan-corwin-conference*

DR

1 Entretien avec l'astrophysicien Michel Mayor P. 34
2 Quatre méthodes de détection des planètes P. 38
3 Atmosphères: leur composition se précise P. 40
4 Qu'est-ce qu'une planète habitable ? P. 43
5 La bible des exoplanètes p. 48

TERRES EN VUE !

À la recherche de planètes habitables

Voici vingt ans que la première planète extrasolaire a été repérée par le faible mouvement qu'elle induit sur son étoile. Depuis, les astronomes ont déniché environ 2 000 exoplanètes. Et la chasse à ces mondes lointains n'est pas près de s'arrêter. Des instruments toujours plus précis sont mis au point pour poursuivre cette quête vers son but ultime : la découverte d'une planète avec de la vie, autour d'un autre Soleil. Car les astrophysiciens en sont aujourd'hui certains : parmi les milliards de planètes de notre Galaxie, les planètes habitables sont nombreuses.

La ressemblance n'est sans doute pas aussi spectaculaire que sur cette vue d'artiste. Néanmoins, Kepler 186f est bien l'une des planètes les plus semblables à la Terre découverte à ce jour. De même taille, et située comme elle ni trop près ni trop loin de son étoile, elle pourrait abriter la vie.

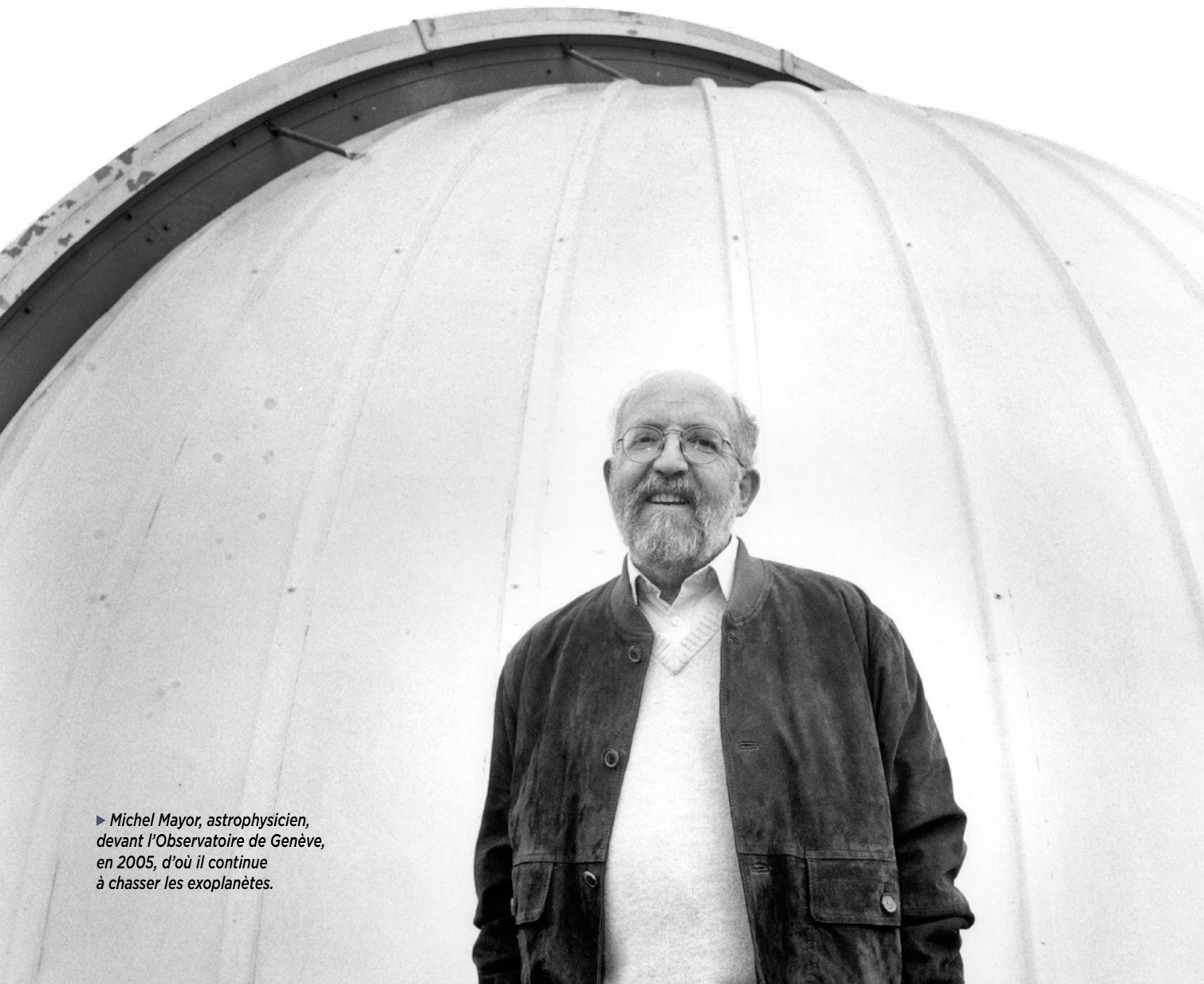
NASA AMES/SETI INSTITUTE/JPL-CALTECH

1

“La quête d’exoplanètes est devenue un pan majeur de l’astrophysique”

Voici vingt ans, l’astrophysicien suisse Michel Mayor observait la première exoplanète. Il revient sur sa découverte et raconte la révolution qui s’en est suivie.

Propos recueillis par Philippe Pajot



▶ *Michel Mayor, astrophysicien, devant l’Observatoire de Genève, en 2005, d’où il continue à chasser les exoplanètes.*

La Recherche **Votre découverte de la première exoplanète a 20 ans. Depuis, l'excitation pour ce domaine n'est pas retombée. Comment l'expliquez-vous ?**

Michel Mayor En deux décennies, la quête d'exoplanètes est même devenue un pan majeur de l'astrophysique. Près de 2 000 exoplanètes ont été répertoriées à ce jour et les découvertes se poursuivent. Si l'on regarde les plans stratégiques des grands observatoires à travers le monde, tous mettent en avant le thème des exoplanètes. C'est quelque chose qu'on ne pouvait pas deviner en 1995. Trois ans auparavant, l'annonce de l'existence de planètes autour de pulsars, étoiles très denses, n'avait pas suscité un engouement particulier. Mais lorsque, avec Didier Queloz, nous avons fait savoir que nous tenions une première planète autour d'une étoile classique, une étoile de la séquence principale (*), l'excitation a été énorme.

Les études mentionnent l'existence possible de milliards de planètes dans notre Galaxie. Combien d'entre elles seraient habitables, autrement dit présenteraient des conditions favorables à l'émergence de la vie ?

On ne peut pas donner de chiffre précis, mais nul doute qu'il y en a des quantités colossales. Des planètes analogues à la Terre, de petite masse et tournant autour de leur étoile en un an environ, ne peuvent pas être repérées : les méthodes de détection n'ont pas encore la sensibilité nécessaire pour le faire. Pour ce type de planète, les extrapolations statistiques sont donc un peu hardies. En revanche, les observations de planètes autour d'étoiles plus petites et moins chaudes que le Soleil sont nombreuses. Du coup, les estimations sont plus fiables : plusieurs dizaines de pourcents de ces étoiles auraient des planètes habitables. Enfin, les modèles théoriques de formation planétaire indiquent que les planètes de petite masse se forment en pagaille. Quand on rapporte cela au nombre d'étoiles de la Galaxie, on arrive potentiellement à des milliards de planètes dont les conditions seraient favorables à la vie.

Peut-on dresser un portrait-robot d'un système planétaire de notre Galaxie ?

Pas vraiment, car la diversité des systèmes planétaires est énorme : ce ne sont pas du tout des reproductions fidèles de notre système solaire. On trouve des planètes-océans, des planètes rocheuses – comme la Terre ou Mars –, des systèmes avec beaucoup de planètes (systèmes multiples), des planètes gazeuses parfois très proches de leur étoile… La plus proche de son étoile que l'on connaisse aujourd'hui tourne autour de cette dernière en un peu plus de 4 heures ! Par comparaison, Mercure, la plus proche planète du Soleil, est sur une orbite de 88 jours. On a même repéré des planètes en orbite autour de deux étoiles. Et cet inventaire n'est pas terminé, car on trouve presque chaque semaine un nouveau système plus étonnant que le précédent. À mesure de ces découvertes, on se rend compte de la complexité de la physique de l'intérieur des planètes. Les astronomes ont un nouveau terrain de jeu que l'on n'imaginait pas.

Vous avez découvert en 1995 la première planète extrasolaire, baptisée 51 Peg b. Comment vous y êtes vous pris ?

Les planètes extrasolaires sont tellement lointaines qu'on ne peut pas les voir directement. D'où l'idée d'utiliser un phénomène gravitationnel : quand une planète tourne autour d'une étoile, elle fait faiblement osciller l'étoile. Par exemple, une planète de la taille de Jupiter en orbite autour du Soleil fait bouger ce dernier jusqu'à des vitesses d'une dizaine de mètres par seconde. Si vous avez un instrument capable de repérer ce mouvement, vous pouvez en déduire la présence de la planète. Or dès 1977, nous avions construit avec mon collègue André Baranne, ingénieur opticien à Marseille, un tel instrument : un spectrographe. En analysant la lumière des étoiles, cet appareil mesure à l'aide de l'effet Doppler (*) leur vitesse d'approche ou d'éloignement dans la direction de la ligne de visée. Autrement dit, il mesure la vitesse radiale. À l'époque, notre spectrographe, installé à l'observatoire de Haute-Provence, mesurait des vitesses avec une précision de 300 mètres par seconde. Il nous a permis notamment d'étudier la vitesse des étoiles dans les amas globulaires.

Cet instrument permettait-il de déceler des planètes ?

Non, il n'avait aucune prétention de cet ordre, car il n'était pas assez sensible. Mais à la fin des années 1980, le directeur de l'observatoire, qui avait besoin d'instrumentation pour les nuits où la lumière de la Lune gênait l'observation des galaxies, nous a demandé un nouveau spectrographe. En vingt ans, la technique avait considérablement évolué, de sorte que nous pouvions mesurer des vitesses aussi petites que •••

BIO

1942 Naissance de Michel Mayor à Lausanne, en Suisse.
1971 Soutient une thèse en astronomie à l'Observatoire de Genève sur la dynamique des galaxies.
1977 Met au point le spectrographe Coravel, qui permet de mesurer des vitesses d'étoiles de 300 m/s.
1995 Découvre 51 Peg b, première planète extrasolaire autour d'une étoile analogue au Soleil, à l'aide du spectrographe Elodie.
2007 Découvre Gliese 581 c, la première exoplanète dans la zone habitable.

(*) La séquence principale est la période d'évolution des étoiles normales : elle commence quand la réaction de fusion nucléaire de l'hydrogène débute au sein des étoiles et se termine à l'épuisement de ce combustible.

(*) L'effet Doppler est le décalage en fréquence de l'émission d'une source (sonore ou lumineuse). La mesure du décalage indique la vitesse radiale de la source.

François Schaer/UNIGE

3

C'EST LE NOMBRE DE SATELLITES dédiés aux planètes extrasolaires en cours de construction

••• 10 mètres par seconde. Avec un tel gain, on pouvait tenter la recherche d'exoplanètes. En juin 1993, nous avons installé ce nouvel instrument au foyer du télescope de 1,93 mètre de diamètre de l'observatoire de Haute-Provence.

Quelle a été votre stratégie de mesure ?

En se fondant sur des études théoriques, nos prédécesseurs pensaient que les exoplanètes géantes devaient avoir des périodes orbitales d'au moins plusieurs années. Pour déceler cette périodicité, il fallait donc des mesures espacées sur des temps très longs. À l'époque, de telles recherches avaient toutes été négatives. De notre côté, comme nous cherchions des objets inconnus, sans *a priori*, nous n'avions aucune idée de la masse et de la période orbitale que pouvaient avoir ces astres. Aussi avions-nous adopté une stratégie de mesure large qui permettait de découvrir des objets de n'importe quelle période, aussi bien des planètes géantes que des naines brunes, sortes d'étoiles naines, dont on ne connaissait pas non plus les caractéristiques. Cette stratégie a été à notre avantage car, d'une part, nous explorions un grand échantillon d'étoiles autour desquelles pouvaient se trouver des planètes en orbite et, d'autre part, nos mesures étaient relativement fréquentes : nous pouvions observer une étoile quasiment en continu pendant une semaine tous les deux mois. C'est cela qui nous a permis de trouver 51 Peg b, une planète gazeuse géante (de la moitié de la masse de Jupiter) qui tourne autour de son étoile en quatre jours seulement. 51 Peg b est l'archétype du type de planètes que l'on a trouvées ensuite en abondance, baptisées Jupiter chauds, car elles sont très proches de leur étoile et donc chauffées fortement par cette dernière.

Que nous a appris cette première planète extrasolaire ?

Elle a d'abord apporté la preuve de l'existence de telles planètes. Ensuite, cela a permis de mettre en évidence ce mécanisme majeur de formation des systèmes planétaires qu'est la migration orbitale. Les planètes naissent dans une nébuleuse constituée de gaz, de grains de glace et de poussières. Pour former une planète gazeuse, il faut que des grains de glace et de gaz s'accumulent. Or, près de l'étoile, ces grains de glace et le gaz sont fondus et chassés par le chauffage de l'étoile. Du coup, près de l'étoile, il ne reste que des poussières – silicates et fer – mais en trop faible quantité pour former de grosses planètes. Autrement dit, dans la nébuleuse, jusqu'à une distance de l'étoile d'environ 150 millions de kilomètres, il y a une zone nettoyée de glace et de gaz. Dès lors, comment expliquer que l'on observe des Jupiter chauds, de grosses planètes proches de leur étoile, puisqu'elles n'ont pas pu se former là ? On imagine que les planètes gazeuses sont nées dans la nébuleuse, loin de l'étoile, et se sont ensuite rapprochées. Cette « migration orbitale » serait ainsi un phénomène courant – on trouve beaucoup de Jupiter chauds –, mais dont on ne connaît pas encore toutes les subtilités.

Existe-t-il d'autres méthodes de détection ?

Oui. La mesure des vitesses radiales a certes permis de belles découvertes, mais une autre méthode est maintenant très utilisée : les transits planétaires. Un transit est le passage d'une planète devant son étoile, comme une éclipse, d'où résulte une baisse périodique de la luminosité de l'étoile. Dès 1999, une première exoplanète était découverte par cette méthode et, depuis, le satellite Kepler de la Nasa scrute les étoiles à la recherche de transits : à lui seul, il a ainsi découvert plus de 1 000 exoplanètes. Toutefois, la méthode des transits permet de connaître la taille d'une planète, mais pas sa masse. Or, pour confirmer l'existence d'une planète et surtout avoir des indications sur sa nature, il faut ces deux paramètres à la fois, afin d'en déduire la densité. C'est à cette condition que l'on peut savoir si la planète est rocheuse ou gazeuse. Kepler a ainsi décelé des milliers de candidats planètes qui n'ont pas tous été confirmés, car bon nombre concernaient des étoiles trop peu lumineuses pour que l'on puisse trouver leur masse par vitesse radiale. D'autres méthodes sont en train d'émerger. Par exemple, des astrophysiciens américains sont parvenus à mesurer la masse d'une exoplanète aussi légère que Mars, mais très proche de son étoile, en analysant les temps de transit dans un système multiple (1). On commence aussi à faire des images de quelques exoplanètes (2).

Quels instruments traquent les exoplanètes actuellement ?

Outre Kepler, il existe des spectrographes capables de déceler si une étoile s'approche ou s'éloigne de nous périodiquement de 30 centimètres par seconde, soit 1 km/h. Ce gain de précision d'un facteur 1 000 en trente ans est assez fantastique. Avec des collègues français, nous avons installé il y a douze ans un tel spectrographe baptisé Harps au foyer du télescope européen de 3,6 mètres de diamètre de l'ESO à la

Silla, au Chili. Puis, en collaboration avec des astronomes d'Écosse et de Harvard, aux États-Unis, nous avons construit un second exemplaire de Harps, en place depuis trois ans dans l'hémisphère Nord, sur le télescope italien de 3,58 mètres de diamètre de la Palma, aux Canaries. Ce sont actuellement les spectrographes les plus précis au monde. On peut déceler des planètes de type terrestre, ou un peu plus massive que la Terre. Sur les 19 planètes de masse inférieure à 25 masses terrestres découvertes (ce qu'on appelle des superterres), 15 l'ont été par les instruments Harps. L'un des derniers résultats obtenu à l'aide de Harps Nord concerne la détection d'un système planétaire baptisé HD219134, à seulement 21 années-lumière de nous. Il comporte une planète géante lointaine et trois superterres, dont une qui transite près de son étoile (3). Un système dont la proximité va permettre une étude plus poussée pour nous aider à mieux comprendre la formation planétaire.

De nombreuses missions sont prévues pour dénicher encore plus d'exoplanètes.

Effectivement, trois satellites sont en cours d'élaboration. La mission Tess de la Nasa est un petit satellite qui devrait être lancé en 2017 et qui va étudier les étoiles brillantes et proches pour y chercher des transits. Cheops, petit satellite de l'Agence spatiale européenne (ESA), est également prévu pour la fin 2017. Il scrutera des étoiles dont on sait qu'elles possèdent des planètes découvertes par vitesse radiale pour voir si certaines sont en transit. Enfin Plato est une mission « de luxe » de l'ESA, dont la mise en service est prévue en 2024. Ce satellite va explorer la moitié de la voûte céleste pour y rechercher des baisses périodiques de la luminosité des étoiles, mais aussi pour étudier les oscillations propres des étoiles, ce qu'on appelle l'astérosismologie qui donne des informations sur la structure de l'étoile. Surtout, Plato pourra trouver des planètes de la masse de la Terre dans la zone d'habitabilité d'étoiles de type solaire, la zone où l'eau peut être liquide. Une capacité que n'auront ni Tess ni Cheops. Et les petites planètes ainsi découvertes pourront être suivies du sol en vitesse radiale.

Avec quels instruments se fera le suivi des planètes qui seront découvertes ?

À l'aide des deux spectrographes Harps, mais les astronomes planchent aussi sur une version « de luxe ». Un télescope de 3,6 mètres avec un spectromètre de type Harps n'étant pas toujours suffisant pour étudier les étoiles faibles – on ne recueille pas assez de photons –, le projet Espresso en cours de construction par des collègues européens vise à pallier ce manque. Dans sa philosophie, il s'agit toujours du même type de mesure – mesure de vitesse radiale par effet Doppler –, mais ce sera le nec plus ultra technologique, un instrument de sept tonnes, sous vide, alimenté par des fibres optiques avec des tas de ruses pour le stabiliser en température. Dès 2017, il recevra la lumière d'un télescope de 8 mètres du Very Large Telescope de l'ESO, sur le mont Paranal, au Chili. L'objectif est de mesurer une vitesse radiale des étoiles inférieure à 0,1 mètre par seconde, ce qui est l'ordre de grandeur du mouvement que la révolution de la Terre imprime au Soleil.

> **“ Il y aurait des milliards des planètes dont les conditions seraient favorables à la vie ”**

On devrait donc détecter des planètes semblables à la Terre ?

Trouver une planète rocheuse à une distance telle de son étoile que de l'eau liquide puisse exister à sa surface, à coup sûr on en trouvera d'ici quelques années. En tout cas avec la mission Plato, et même avec la méthode des vitesses radiales, je suis assez confiant. Le problème, c'est de faire de la spectroscopie de l'atmosphère de ce type d'objet pour vérifier si on y trouve des signatures de la présence de vie (lire p. 40). Pour des raisons de faisabilité et de coûts, les missions qui auraient permis cela ont été abandonnées. Avec les instruments projetés actuellement, on pourra certes trouver des nouvelles molécules dans l'atmosphère d'exoplanètes, mais de là à trouver des signatures de la vie, je ne m'avancerais pas. Quoi qu'il en soit, la question de la détection de la vie dans l'Univers ne va pas s'éteindre pour autant. Il y a deux mille ans, les philosophes grecs débattaient déjà de cette question. Ce n'est pas maintenant, alors que l'on commence à avoir la capacité technique d'y répondre, que cela va s'arrêter. Cela prendra peut-être une génération, peut-être deux, mais cette recherche de la vie ailleurs va se poursuivre. ■

(1) D. Jontof-Hutter *et al.*, *Nature*, 522, 321, 2015.
(2) B. Macintosh *et al.*, *Science*, DOI: 10.1126/science.aac5891, 2015.
(3) F. Motalebi *et al.*, *A&A*, 31 juillet 2015.

2

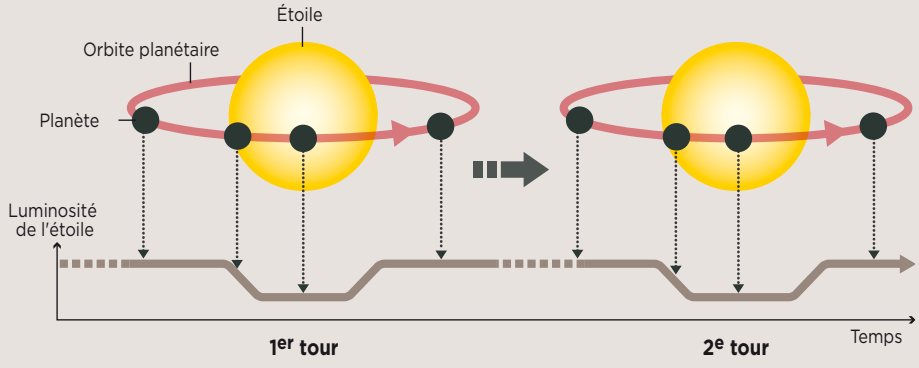
Quatre méthodes de détection des planètes

Au cours des deux dernières décennies, les quatre méthodes principales de détection ont dévoilé près de 2000 exoplanètes. D'autres méthodes existent, mais sont encore difficilement applicables.

Philippe Pajot, journaliste, **et Bruno Bourgeois,** infographiste

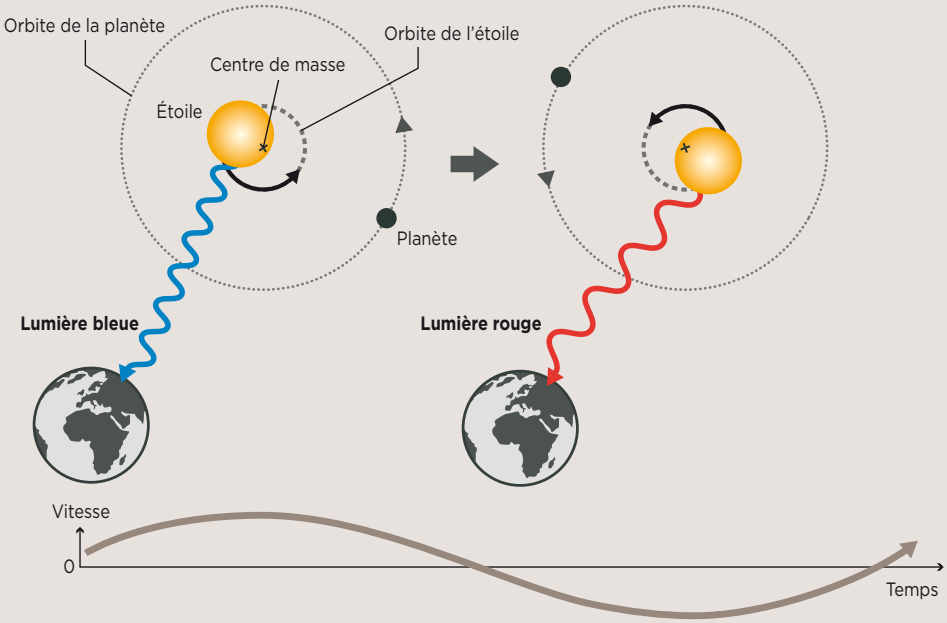
1 Transit

Quand le plan de l'orbite d'une exoplanète est aligné avec notre ligne de visée, on voit la planète passer périodiquement devant son étoile. Ce transit engendre une baisse de luminosité régulière de l'étoile qui trahit la présence de la planète et indique sa taille. La méthode des transits est redoutablement efficace à partir de l'espace.



2 Vitesse radiale

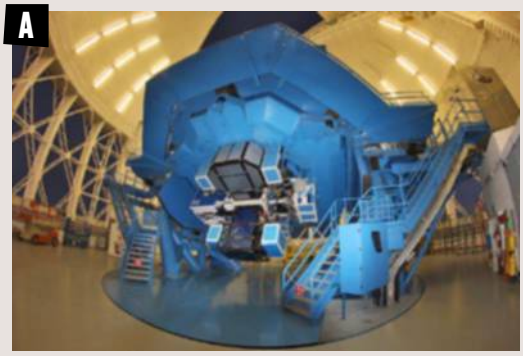
Lorsqu'une étoile possède une planète, les deux astres tournent autour de leur centre de masse commun. Dans l'orbite de l'étoile autour de ce centre, il arrive que l'étoile s'approche de nous (à gauche). La lumière qui nous en parvient est alors décalée vers le bleu, ce qui permet de mesurer sa vitesse radiale, vitesse le long de la ligne de visée. Quand l'étoile s'éloigne (à droite), la lumière est décalée vers le rouge. Pour une planète analogue à Jupiter tournant autour du Soleil, la vitesse radiale maximale du Soleil serait d'une dizaine de mètres par seconde (40 km/h).



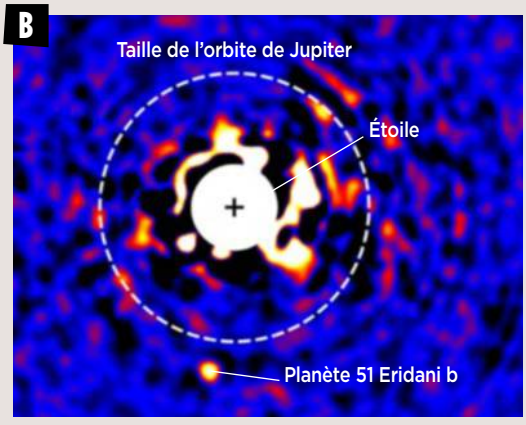
3 Imagerie

Les exoplanètes sont invisibles directement, excepté pour de gros objets, à la limite entre planètes géantes et naines brunes. L'imageur de planètes Gemini (photo A), installé depuis 2013 sur le télescope Gemini-Sud, au Chili, vient de débusquer une exoplanète analogue à Jupiter (Photo B). La technique de l'imagerie gagnera en efficacité quand elle sera mise en œuvre dans l'espace, sur le télescope spatial James-Webb, prévu pour être lancé en 2018.

A

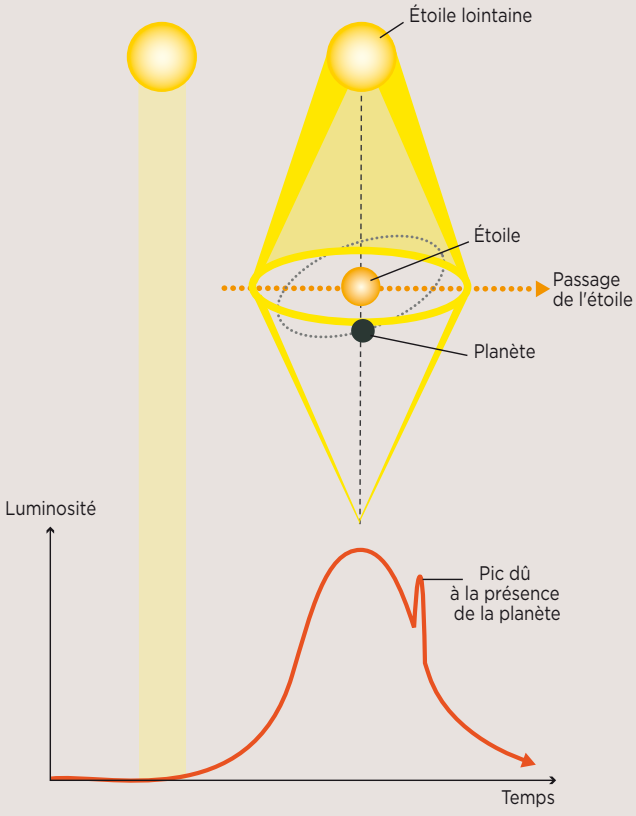


B



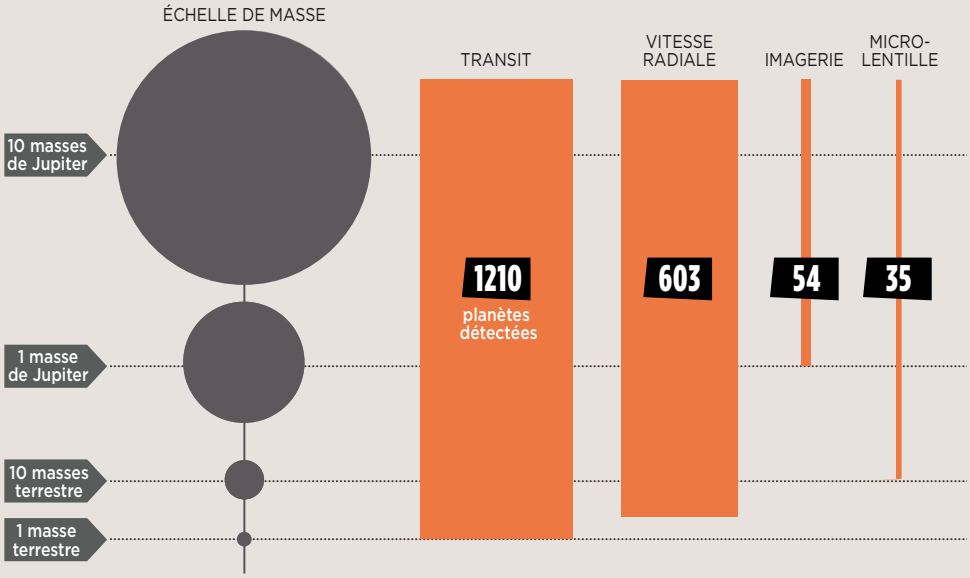
4 Microlentille

Une étoile qui passe devant une étoile lointaine agit comme une lentille : la lumière de l'étoile lointaine est amplifiée. Si cette étoile contient une planète, il se produit une amplification supplémentaire. Cet effet de microlentille gravitationnelle est surveillé à l'aide de réseaux de télescopes au sol qui scrutent de grandes quantités d'étoiles.



L'efficacité des 4 méthodes

Le graphique illustre la sensibilité des quatre techniques décrites. La méthode du transit, une des plus efficaces, permet de détecter des planètes de masse identiques à celle de la Terre, voire plus légères encore. La surface des rectangles est proportionnelle au nombre d'exoplanètes déjà détectées par chaque méthode.



DR

Entretien avec

Marc Peschanski et Frédéric Revah

Le traitement des maladies rares nécessite un raffinement extrême. En se penchant sur le défi médical et technologique qu'elles représentent, les laboratoires de Généthon et d'I-Stem font progresser la connaissance et la thérapie de nombre de pathologies, parfois bien plus communes. Rencontre avec leurs directeurs.

“ Nous travaillons comme des chercheurs d'or ”

Propos recueillis par Sophie Coisne et Mathias Germain

Ce sont des organismes pionniers en matière de biothérapie. Généthon développe des produits pour remplacer, chez un malade souffrant d'une mutation génétique, un gène défectueux par un gène sain. L'Institut des cellules souches pour le traitement et l'étude des maladies monogéniques (I-Stem) mène des recherches tout aussi audacieuses. Ici, on vise le sur-mesure de la greffe en fabriquant les cellules saines qui font défaut aux patients. Et quels patients! Souffrant de maladies rares, ils n'intéressent guère l'industrie pharmaceutique. Et une autre chose relie ces organismes et leurs directeurs, Marc Peschanski pour I-Stem et Frédéric Revah pour Généthon : leurs recherches sont financées et leurs choix stratégiques pilotés par les malades, en l'occurrence l'association AFM-Téléthon. Nous avons cherché à savoir à quel point cette alchimie particulière était efficace.

BERTRAND DESPREZ POUR LA RECHERCHE

◂ À gauche, Marc Peschanski, spécialiste des cellules souches, est le fondateur et le directeur d'I-Stem depuis 2005. À droite, Frédéric Revah, spécialiste de la thérapie génique, a été nommé directeur général de Généthon en 2010.

La Recherche Les recherches sur les thérapies génique et cellulaire menées par vos laboratoires suscitent beaucoup d'espoir. Quand aboutiront-elles à des applications concrètes chez les malades ?

Frédéric Revah Depuis la démonstration de son efficacité chez les bébés-bulle en 1999, la technique de remplacement d'un gène défectueux par un gène sain a dépassé le cadre des essais cliniques chez l'homme. En 2012, un produit de thérapie génique conçu par un laboratoire hollandais a ainsi obtenu une autorisation de mise sur le marché (AMM) européenne pour une maladie héréditaire très rare, un déficit en lipoprotéine lipase. Et beaucoup de produits sont en cours d'essais cliniques dans le monde. En ce qui nous concerne, nous participons à quatre essais cliniques à ce jour, plusieurs autres sont en préparation, dont deux pour l'année 2016. •••

DATES CLÉS

1987 : premier Téléthon en France.
1990 : création de Généthon.
1999 : premier succès de thérapie génique chez des bébés-bulle.
2004 : recherches sur les cellules souches embryonnaires autorisées par dérogation en France.
2005 : création d'I-Stem.
2009 : première reconstitution d'un épiderme humain à partir de cellules souches embryonnaires.
2014 : fabrication de neurones moteurs humains à partir de cellules souches embryonnaires.
2015 : résultats positifs sur six personnes atteintes du syndrome de Wiskott-Aldrich, traitées par thérapie génique.

••• En quoi consiste-t-elle ?

F. R. Prenons l'exemple de sept jeunes malades auxquels nous avons proposé ce traitement à partir de 2010. Ils souffrent d'un déficit immunitaire complexe et rare, le syndrome de Wiskott-Aldrich. Il est lié à des mutations d'un gène sur le chromosome X, qui code la protéine WAS. Cette dernière est exprimée dans plusieurs types de cellules immunitaires et du sang. Cette pathologie touche essentiellement les garçons. Elle se traduit par des hémorragies, des infections graves et répétées, de l'eczéma sévère et, chez certains patients, des réactions auto-immunes et l'apparition de cancers.

Quel est le traitement disponible à ce jour ?

F. R. La greffe de moelle osseuse, qui nécessite un donneur compatible et peut provoquer des complications graves. Notre traitement de thérapie génique consiste à prélever, chez les malades, des cellules souches (*) sanguines porteuses de l'anomalie génétique, puis à les corriger en laboratoire en introduisant le gène WAS sain grâce à un « transporteur ». Ce dernier n'est autre qu'un virus modifié pour ne plus être virulent, ou « vecteur viral », que nous avons développé et produit en grande quantité. Les cellules traitées sont ensuite réinjectées aux malades – qui ont été au préalable traités par chimiothérapie afin d'éliminer leurs cellules souches malades et de faire de la place aux cellules traitées. Après leur réinjection, ces cellules donnent naissance aux différentes lignées cellulaires qui composent le sang : les globules rouges et blancs, et les plaquettes. Ce traitement a eu des effets positifs chez six malades : l'eczéma sévère et les infections graves ont disparu (1). Un des patients, qui était cloué dans un fauteuil roulant à cause d'une inflammation des parois de ses vaisseaux sanguins dans les jambes, a pu retrouver une activité physique normale.

À I-Stem, vous travaillez vous aussi sur des maladies rares, mais avec une autre approche : la thérapie cellulaire.

Marc Peschanski Effectivement. La thérapie cellulaire consiste à travailler sur des cellules souches afin de remplacer des cellules ou des tissus déficients d'un organisme. Nos recherches portent sur les cellules souches qui proviennent de l'embryon à un stade précoce, entre le 5e et 7e jour après une fécondation *in vitro*. Elles ont la propriété de se multiplier à l'infini et de donner naissance à tous les types de cellules qui composent notre organisme. Depuis 2007, nous travaillons également sur les cellules pluripotentes induites (iPS) (2). Elles sont obtenues à partir de cellules adultes, différenciées, qui ont été reprogrammées grâce à l'introduction d'un cocktail de gènes. Cela leur redonne l'habilité à se multiplier et à se différencier en différents types de cellules.

Vos travaux ont-ils déjà une application thérapeutique ?

M. P. Nous ne sommes pas encore au stade d'une AMM, mais des essais cliniques sont en cours. Après notre création en 2005, il a fallu d'abord maîtriser, dans un but thérapeutique, les deux grandes propriétés des cellules souches embryonnaires, puis celles des iPS. Pour cela, nous avons dû revoir, ou élaborer, les protocoles de prolifération et de différenciation cellulaire afin d'obtenir des cultures de cellules aussi homogènes que possible. Cela a pris quelques années. Aujourd'hui, à partir de ces travaux, nous sommes capables d'obtenir une quinzaine de types de cellules, de façon homogène, comme des cellules de la peau – les kératinocytes et les mélanocytes – ou des neurones très précis, par exemple des neurones impliqués dans la motricité, les motoneurones. Pour ces neurones, le protocole que nous avons publié permet de faire, à volonté, soit des motoneurones de la moelle épinière cervicale, soit des motoneurones localisés juste au-dessus, dans le tronc cérébral.

Pour obtenir des cellules différenciées, avez-vous manipulé génétiquement les cellules d'origine ?

M. P. Non, nous ne faisons pas de modification génique de ces cellules. Nous voulons des cellules qui reproduisent le mieux possible la physiologie naturelle, soit parce qu'on veut les utiliser en thérapie cellulaire, c'est-à-dire les greffer chez un malade, soit parce que ce sont des cellules issues d'embryons porteurs d'une maladie génétique. Dans ces cas-là, elles sont utilisées pour approfondir notre connaissance de la maladie : nous y observons alors les mécanismes pathologiques et nous testons sur elles des composés pharmacologiques.

En fait, vous utilisez ces cellules comme matériau pour tester ces médicaments ?

M. P. J'appelle ça la « technique des chercheurs d'or ». Nous sommes comme des chercheurs avec un tas de sable, en l'occurrence un tas de molécules, dans lequel nous avons l'espoir de trouver une pépite, c'est-à-dire pour nous un médicament. Et notre tamis, ce sont nos cellules. Ainsi à I-Stem, les cellules que nous obtenons permettent de passer au crible deux « tas de sable » : le premier est une banque de 22 000 composés chimiques – ce n'est pas énorme, les laboratoires pharmaceutiques peuvent en avoir plus d'un million, mais cela représente quand même une certaine diversité chimique – pour espérer

découvrir de nouvelles molécules susceptibles de corriger des anomalies associées aux pathologies.

Et quel est le deuxième « tas de sable » ?

M. P. Il s'agit d'une banque de 2 000 molécules qui ont, ou ont eu, une indication thérapeutique et pourraient être utilisées pour une autre indication, on dit « repositionnées ». Toutes ces molécules ont donc déjà passé les étapes de développement pharmaceutique. Et surtout, leur toxicité a été évaluée. On sait donc déjà qu'on peut les utiliser chez l'homme. De ce fait, si nous découvrons parmi elles une molécule efficace pour une des maladies rares que nous étudions, nous pouvons aller très vite vers un essai chez les malades. C'est ce qui s'est produit pour la maladie de Steinert, la plus fréquente des dystrophies musculaires de l'adulte, caractérisée par une lenteur anormale de la décontraction musculaire qui désorganise tous les mouvements, et par une atteinte de très nombreux autres organes. Chez des neurones moteurs, issus d'une différenciation de cellules souches embryonnaires porteuses de la mutation génétique responsable de la maladie, nous avons découvert en 2011 que deux gènes n'étaient pas bien exprimés (3). Ayant saisi ce mécanisme, nous avons pu tester sur ces neurones des molécules susceptibles de le contrer. Une molécule a eu *in vitro* des effets positifs. Nous avons pu ainsi commencer rapidement, il y a plus d'un an, un essai clinique dont nous attendons les résultats pour 2016.

Et en matière de greffes cellulaires, avez-vous lancé des essais cliniques ?

M. P. En 2009, nous avons fait la démonstration que nous étions capables, à partir de cellules souches embryonnaires, de reproduire toutes les cellules de l'épiderme (4). Il s'agissait d'un préalable pour fabriquer des cellules de peau destinées à des malades. À la suite de ces travaux, nous nous préparons à lancer un essai clinique chez des malades atteints de drépanocytose, une maladie héréditaire touchant l'hémoglobine des globules rouges, qui subissent une complication cutanée très handicapante. Ils ont au niveau des jambes des ulcères cutanés, des trous de 10 à 20 cm^2 dans la peau laissant la chair à vif, qui ne répondent à aucun traitement. Nous nous préparons à déposer une demande auprès des autorités sanitaires pour greffer, chez ces malades, de la peau issue de nos cultures de cellules.

Cela doit poser des problèmes de production. Combien de cellules sont nécessaires pour ces malades ?

M. P. Nous avons besoin de 300 000 cellules de peau (kératinocytes) pour couvrir un centimètre carré de plaie. Donc pour 10 cm^2 chez un malade, nous avons besoin de trois millions de cellules. Aujourd'hui, nous avons mis au point des techniques qui permettent d'amplifier la production de cellules. Par exemple, notre banque de cellules souches embryonnaires contient à peu près 200 millions de cellules. Nos robots assurent leur prolifération, leur différenciation en kératinocytes, puis la multiplication de ces kératinocytes. En mettant 750 000 cellules souches embryonnaires dans une flasque, on obtient au bout de trois mois 320 millions de kératinocytes… Donc au regard de ces chiffres, nous avons les moyens de traiter une centaine de malades. Mais nous sommes bien conscients qu'il faut passer à une étape supérieure si nous souhaitons que cette technique soit indiquée pour d'autres pathologies qui touchent un bien plus grand nombre de malades. Nous nous orientons progressivement vers une industrialisation plus massive encore de cette production.

> **“ Dans un tas de molécules, nous avons l'espoir de trouver une pépite : un médicament ”**
>
> **Marc Peschanski,** directeur d'I-Stem

À Généthon, êtes-vous confrontés au même défi industriel ?

F. R. Oui car, pour être efficaces, nous avons besoin de quantités astronomiques de vecteurs transportant les gènes. Prenons l'exemple d'études que nous avons réalisées pour traiter une myopathie tubulaire. Très invalidante, elle entraîne le décès de la moitié des malades avant l'âge de 2 ans (5). Nous avons estimé qu'il fallait injecter environ 10^{15} vecteurs viraux portant le gène sain chez chaque malade. Pour cette maladie, on compte près de 50 nouveaux cas dans le monde par an. Mais pour la myopathie de Duchenne, une maladie dans laquelle ce type de thérapie est envisageable, c'est plusieurs dizaines de milliers de malades dans le monde qu'il faut traiter! Donc si vous voulez que ces technologies servent concrètement les malades, cela nécessite une production massive de vecteurs. Le défi industriel est d'autant plus grand que ces produits de thérapie génique sont beaucoup plus complexes que des molécules chimiques. Si l'on retient la taille comme indicateur de complexité, notez qu'un vecteur •••

(*) Une cellule souche est une cellule indifférenciée qui se caractérise par sa capacité à générer des cellules différenciées, c'est-à-dire ayant une fonction tissulaire précise.

••• viral est 10 000 fois plus gros qu'une molécule pharmacologique classique comme le Prozac.

En quoi le fait d'être financé par l'AFM-Téléthon change-t-il le fonctionnement de la recherche ?

M. P. Généthon en 1990, puis I-Stem en 2005, sont nés de décisions audacieuses portées par des patients qui se sont emparés d'idées nouvelles, l'utilisation du génome ou des cellules souches embryonnaires. Lorsqu'en 2004, j'ai rencontré les responsables de l'AFM, Bernard Barataud et Laurence Tiennot-Herment, pour la création d'I-Stem, j'ai senti qu'ils avaient la volonté de rompre avec un train-train. Cette idée de rupture est la marque de fabrique de l'AFM. Et puis, il y a le Téléthon, on ne peut pas faire abstraction de trente ans de financements.

F. R. Le conseil d'administration de l'AFM-Téléthon, qui est composé de malades, de parents de malades, nous pousse à être créatifs, plus rapides. Je ne suis là que depuis cinq ans, mais ce qui m'a frappé, c'est à la fois l'obstination, la persévérance, combinées à un sentiment d'urgence. Une volonté farouche d'avancer. Ce ne sont pas des scientifiques qui parlent aux scientifiques, ce sont des malades qui parlent aux scientifiques, et ils n'hésitent pas à les secouer. Ce sont les malades qui mettent les moyens sur la table. Et lorsqu'ils accordent des moyens, ce n'est pas du saupoudrage, et ils attendent des résultats.

> **“ Nos découvertes peuvent être notamment transférées dans le domaine de la cancérologie ”**
>
> **Frédéric Revah,** directeur de Généthon

Les recherches sur les cellules issues de l'embryon humain suscitent des oppositions. Ces cellules pourraient-elles être remplacées par les cellules pluripotentes induites (iPS), comme le soutiennent vos détracteurs ?

M. P. Certes, les cellules iPS ont des propriétés proches de celles des cellules souches embryonnaires, et elles sont obtenues à partir de cellules de personnes adultes. Mais il faut travailler avec beaucoup de prudence avec les iPS. Elles ont un défaut : la reprogrammation d'une cellule adulte en cellule pluripotente ne gomme pas les marques épigénétiques. Elle les modifie de façon aléatoire. Or ces marques épigénétiques modifient l'expression des gènes. Les cellules iPS présentent donc des différences importantes sur ce plan avec les cellules souches embryonnaires. Ainsi, lorsque vous étudiez des maladies dont les causes génétiques sont extrêmement subtiles, utiliser des cellules iPS pour les modéliser peut être source d'erreurs. C'est pourquoi nous travaillons avec des iPS lorsque nous n'avons pas de cellules souches provenant d'embryons porteurs de la maladie qui nous intéresse. Nous contrôlons alors beaucoup plus soigneusement nos résultats et nous sommes parfois obligés d'y renoncer.

Vos découvertes se limitent-elles aux maladies génétiques rares ?

M. P. Ce que nous découvrons peut avoir des retombées pour des maladies plus fréquentes. Par exemple, nos récents travaux sur les mécanismes de la neurofibromatose, une maladie génétique qui altère la couleur de la peau, pourront certainement avoir des applications en cosmétique. En matière de thérapie cellulaire, nos découvertes sur l'épiderme dépasseront le cadre des ulcères cutanés dus à la drépanocytose, elles pourraient s'appliquer à des ulcères qui accompagnent les troubles veineux ou compliquent le diabète. De même, nos traitements en cours d'essai pour la rétinite pigmentaire d'origine génétique pourraient avoir un intérêt dans le traitement de certaines formes sèches de dégénérescence maculaire liée à l'âge (DMLA), dont souffrent 600 000 personnes âgées en France.

F. R. C'est également le cas pour la thérapie génique. Nos découvertes peuvent être transférées dans d'autres domaines. Un exemple en cancérologie avec ce qu'on appelle les CAR T-cells : ce sont des globules blancs, des lymphocytes T, prélevés chez un patient, puis modifiés génétiquement *in vitro* de manière à leur faire exprimer un récepteur artificiel, dit « chimérique ». Ce récepteur est conçu de telle manière qu'il reconnaît une molécule caractéristique de la tumeur. Ces CAR T-cells s'attaquent donc spécifiquement aux tumeurs du malade, tout en évitant les effets néfastes sur d'autres organes. Depuis trois ans, cette technique donne des résultats extrêmement prometteurs dans certaines formes de cancers. Or elle est en partie issue des technologies mises au point pour les bébés-bulle, qui ne représentent que quelques dizaines de patients dans le monde… ■

(1) S. Hacein-Bey Abina *et al., JAMA, 313*, 1550, 2015.
(2) K. Takahashi *et al., Cell, 131*, 861, 2007.
(3) A. Marteyn *et al., Cell Stem Cell, 8*, 434, 2011.
(4) H. Guenou *et al., Lancet, 374*, 1745, 2009.
(5) MK. Childers *et al., Science Translational Medicine*, doi: 10.1126/scitranslmed.3007523 2014.

Pour en savoir plus

- **www.genethon.fr**
Le site Internet de Généthon.
- **www.istem.eu**
Le site Internet d'I-Stem.
- Bertrand Jordan, *Thérapie génique, espoir ou illusion ?*, Odile Jacob, 2007.

3

Atmosphères : leur composition se précise

Sonder l'atmosphère des exoplanètes à l'aide de puissants télescopes permet d'en savoir plus sur ces mondes lointains, encore bien mystérieux.

David Ehrenreich, astrophysicien

Repères

- **L'étude de l'atmosphère des exoplanètes passe par l'analyse de la lumière émise par ces planètes.**
- **Les télescopes actuels détectent la présence de molécules ainsi que la variation de leur quantité dans l'atmosphère de quelques exoplanètes.**
- **Une nouvelle génération d'instruments, en cours de développement, permettra d'approfondir cette exploration.**

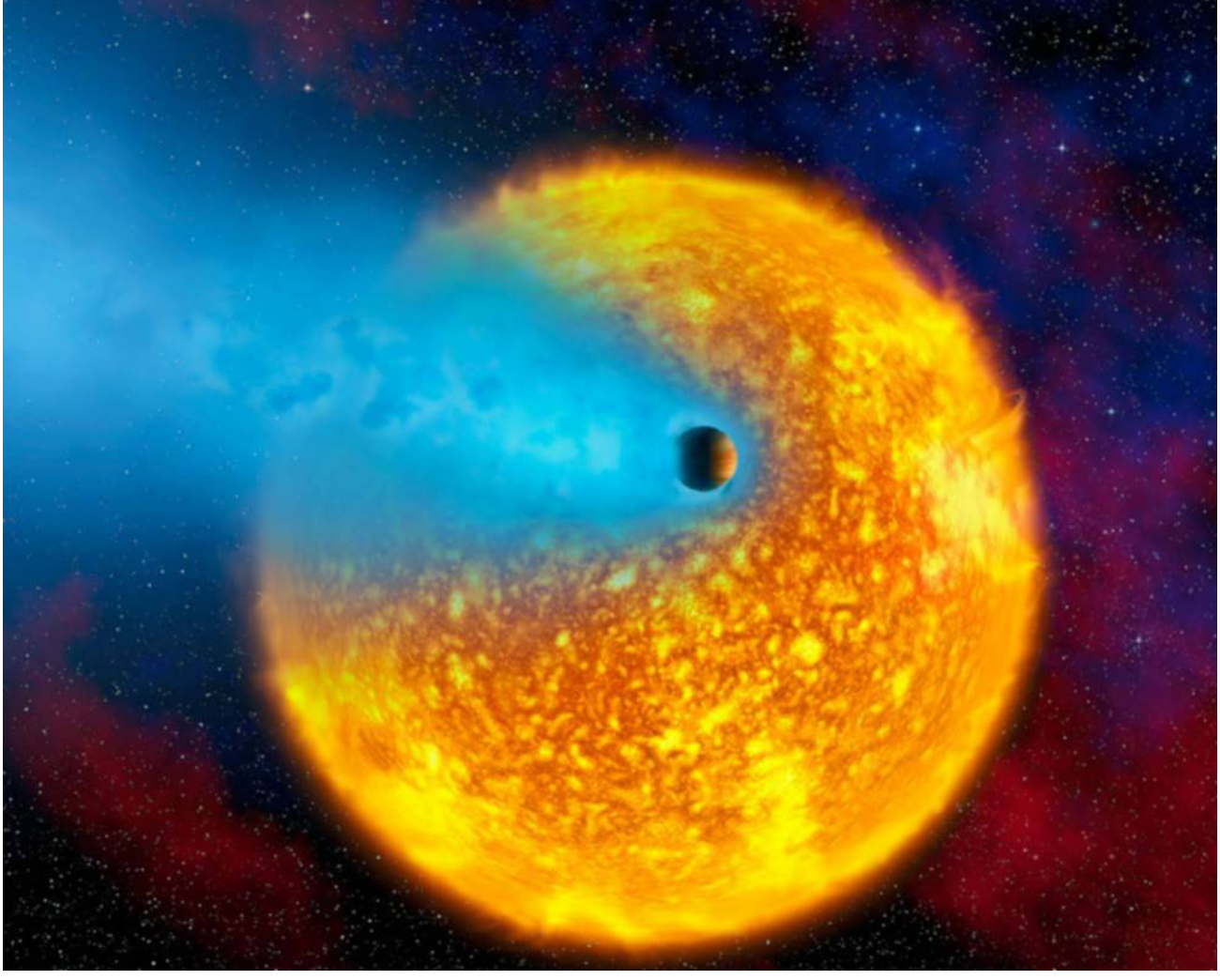
L'analyse de l'atmosphère nous offre un accès unique aux propriétés des exoplanètes. Ce champ d'investigation scientifique récent donne lieu à des courses aux premières, à des controverses, des percées technologiques, des déceptions parfois, mais aussi à des résultats surprenants. Bref, c'est l'aventure ! Et même si les atmosphères d'exoplanètes restent très mystérieuses, d'immenses progrès ont été accomplis ces dernières années.

Nos connaissances dans le domaine reposent pour beaucoup sur l'étude approfondie de deux planètes : HD 209458b, située à 150 années-lumière de la Terre, dans la constellation de Pégase, et HD 189733b, située à 63 années-lumière, dans la constellation du Petit Renard. Toutes deux sont des Jupiter chauds : leurs dimensions sont comparables à celles de Jupiter (dont la masse est de $1{,}9 \times 10^{27}$ kilogrammes et le rayon de 69911 kilomètres), et elles sont aussi constituées essentiellement de gaz. En revanche, leur température est bien supérieure à celle de Jupiter : autour de 1 000 °C, contre - 160 °C environ.

La découverte de HD 209458b date de 1999. Trois ans après, en étudiant son atmosphère à l'aide de l'instrument Stis (Space Telescope Imaging Spectrograph), du télescope Hubble, une équipe de Harvard y a détecté des vapeurs de sodium. Pour ce faire, les astronomes américains ont utilisé la méthode des transits : lorsqu'une planète passe devant son étoile, elle fait momentanément diminuer la luminosité de l'astre, tandis qu'une infime partie de la lumière de l'étoile traverse l'atmosphère de la planète ; cela modifie le spectre lumineux de l'étoile, recueilli par les télescopes.

SIGNATURE SPECTRALE

La détection du transit révèle la présence de la planète et permet de mesurer sa taille. L'analyse de son spectre lumineux permet ensuite d'accéder à la composition de son atmosphère. En effet, quand la lumière stellaire traverse l'atmosphère, chaque espèce chimique qui compose cette dernière absorbe la lumière à des longueurs d'onde spécifiques, et laisse passer les autres. Or les spécialistes savent précisément quelle espèce absorbe quelle longueur d'onde. En analysant les raies d'absorption du spectre de transit, on peut donc déduire quelles espèces chimiques sont présentes dans l'atmosphère. C'est ainsi que deux raies jaunes ont été identifiées dans le spectre de HD 209458b. Ces raies sont caractéristiques du sodium (1). Cette signature spectrale est très sensible aux conditions de pression et de température dans l'atmosphère de la planète et a ainsi fourni aux astronomes un puissant outil de sondage à distance.



▲ *L'évaporation des atmosphères a été observée dès 2003 par une équipe française. Elle apparaît en bleu sur cette vue d'artiste représentant HD 209458b en orbite autour de son étoile. Les astrophysiciens estiment que la perte d'hydrogène s'élève à 10 000 tonnes par seconde.*

ESA/ A. VIDAL-MADJAR/INSTITUT D'ASTROPHYSIQUE DE PARIS/NASA

Le télescope spatial infrarouge Spitzer a lui aussi joué un rôle important dans la caractérisation des atmosphères, grâce à la technique des occultations. Quel en est le principe ? Lorsqu'une planète est devant son étoile, on mesure les spectres des deux à la fois. Lorsqu'elle passe derrière, la lumière émise par la planète disparaît. On peut ainsi enregistrer le spectre de l'étoile seule puis déduire celui de la planète. C'est ce qu'a fait une équipe californienne en mesurant la lumière de HD 189733b émise dans le proche infrarouge, région spectrale proche de celle de la lumière visible. Ils y ont décelé des raies d'absorption de l'eau (2).

Aujourd'hui, les capacités des télescopes spatiaux permettent d'aller plus loin : il ne s'agit plus seulement de détecter la trace de l'une ou l'autre espèce chimique, mais d'en analyser les variations. Une nouvelle caméra sur Hubble a ainsi permis à une équipe de Chicago de mesurer la variation de la signature spectroscopique de l'eau dans l'atmosphère de Wasp-43b, l'une des exoplanètes les plus chaudes jamais détectées (3). Ces dernières années, le développement de l'instrumentation au sol a lui aussi contribué à la caractérisation des atmosphères exoplanétaires. Une équipe néerlandaise a par exemple détecté des molécules d'eau et de monoxyde de carbone sur plusieurs Jupiter chauds en utilisant la haute résolution spectrale d'un instrument infrarouge du Very Large Telescope (VLT), le télescope géant de l'Observatoire européen austral (ESO) au Chili. Cependant, les brumes couvrant de nombreuses exoplanètes chaudes peuvent masquer les molécules dans les basses atmosphères. Il reste alors la possibilité d'explorer la haute atmosphère de ces objets. Ce que notre équipe a fait, il y a quelques mois, en analysant des spectres de HD 189733b pris avec l'instrument Harps, installé sur le télescope de 3,6 mètres de l'ESO. Comme cela avait déjà été fait avec Hubble, nous avons alors détecté la présence de sodium dans l'atmosphère de cette planète (4).

La résolution spectrale de Harps étant vingt fois supérieure à celle de Hubble, nous avons pu observer le profil détaillé des raies de sodium. Leur étude nous a renseignés sur la manière dont la température change avec l'altitude : elle augmente de près de 2 000 °C sur 10 000 kilomètres dans la haute atmosphère. Enfin, grâce à la finesse de notre mesure, nous avons •••

30 000 KM/H

C'EST LA VITESSE DES VENTS VIOLENTS DE HAUTE ALTITUDE qui soufflent dans l'atmosphère de la planète HD 189733b.

▲ **Quand GJ 436b (en blanc) et son exosphère passent entre l'étoile autour de laquelle ils orbitent et nous, ils provoquent une forte baisse de la luminosité, que nous détectons, en provenance de l'étoile. Sans exosphère, la courbe de transit serait symétrique.**

••• découvert un décalage des raies de sodium – normalement de couleur jaune – vers le bleu. Ce décalage est le signe que la haute atmosphère de HD 189733b se rapproche et que quelque chose la pousse vers nous. Un phénomène dû à des vents violents de très haute altitude soufflant à la vitesse terrifiante de 30 000 kilomètres/heure.

Qu'arrive-t-il donc dans les hautes atmosphères de ces exoplanètes? C'est dans ces régions que la formidable débauche d'énergie de leur étoile toute proche est absorbée. Avec une conséquence: l'évaporation des atmosphères. Celle-ci a été observée sur HD 209458b, dès 2003, par une équipe française. En 2012, la même équipe a détecté l'atmosphère étendue – « l'exosphère » – de HD 189733b, et vu sa taille varier après une éruption de son étoile (5). Pour ces Jupiter chauds très massifs, ce phénomène entraîne une perte de masse insignifiante. Mais qu'en est-il pour les exoplanètes moins massives?

EAU, MÉTHANE, DIOXYDE DE CARBONE...

L'étude d'un Neptune tiède (500 °C environ) appelé GJ 436b vient d'apporter une réponse. Cette planète, quatre fois plus grande que la Terre et vingt-trois fois plus massive, est en orbite autour d'une naine rouge (*), et l'une de nos plus proches voisines – à 33 années-lumière de la Terre. La découverte de son transit, en 2007, a donc déclenché une course frénétique pour caractériser son atmosphère.

Observée avec un instrument qui fonctionne dans l'ultraviolet, GJ 436b s'est révélée être une exoplanète spectaculaire: nos mesures, collectées avec Hubble entre 2010 et 2014 et publiées en juin dernier, montrent que la planète est entourée d'une gigantesque enveloppe d'hydrogène, prenant la forme de la chevelure et de la queue d'une comète (6). La chevelure couvre une surface bien plus grande que l'étoile, tandis que la queue s'étend sur près de 15 millions de kilomètres. L'exosphère de GJ 436b est donc bien plus étendue que celles de géantes beaucoup plus chaudes. La forme et la taille remarquables de cette exosphère sont certainement liées à la faible irradiation de la naine rouge, qui peine à balayer le gaz perdu par la planète – de 100 à 1 000 tonnes par seconde tout de même. Malgré ces pertes, la planète n'a pas perdu plus de 10 % de son atmosphère depuis sa formation. Reste à savoir ce qu'il en est pour des planètes encore moins massives, ou encore plus proches de leur étoile, comme les super-terres chaudes et rocheuses découvertes par les satellites Corot et Kepler.

Jusqu'où pourrons-nous pousser l'exploration des atmosphères d'exoplanètes? Caractériser la basse atmosphère de planètes telluriques (rocheuses) semblables à la Terre requerrait un télescope spatial de 40 mètres de diamètre, bien au-delà des 6,5 mètres du futur télescope James-Webb, qui sera mis en orbite en 2018. Ce dernier, successeur de Hubble, permettra cependant d'étudier avec une sensibilité inégalée les atmosphères d'exoplanètes, en les regardant loin du domaine de la lumière visible, dans l'infrarouge lointain. Ce domaine contient la signature de nombreuses molécules (eau, méthane, dioxyde de carbone, etc.). Il va aussi permettre d'étudier les variations temporelles de composition, de température et de couverture nuageuse. Autrement dit, nous accéderons aux climats de ces mondes lointains.

Dans cette perspective, le développement au sol, depuis quelques années, de spectrographes à haute résolution, ouvre une voie complémentaire. Plusieurs copies de Harps sont en service ou vont être développées dans les prochaines années. Elles permettront de valider les nombreuses exoplanètes potentielles détectées par les missions Kepler (en vol), et les futures missions Tess (2017) et Plato (2024), après sélection des planètes les plus facilement caractérisables à l'aide de la mission Cheops (prévue en 2017).

Le futur spectrographe à haute résolution Espresso, qui sera installé en 2017 au VLT, dans le désert d'Atacama au Chili, permettra d'approfondir l'analyse de la haute atmosphère de ces exoplanètes, en complément d'Hubble. Enfin, un instrument encore plus puissant qu'Espresso pourrait équiper, d'ici à 2025, le projet phare de l'ESO: l'ELT (Extremely Large Telescope). En associant la haute résolution spectrale et un miroir de 39 mètres de diamètre, on pourrait alors détecter l'oxygène moléculaire, un des produits de la vie sur Terre, dans l'atmosphère d'une exoplanète terrestre orbitant dans la zone habitable d'une naine rouge. De quoi donner du souffle aux astronomes pour les dix prochaines années! ■

(*) **Une naine rouge** est une étoile peu massive (entre 0,075 et 0,4 masse solaire), ayant une température de surface inférieure à 3 700 °C et une luminosité faible (environ 10 % de celle du Soleil).

(1) D. Charbonneau *et al., ApJ, 568,* 377, 2002.
(2) C.J. Grillmair *et al., Nature, 456,* 767, 2008.
(3) K.B. Stevenson *et al., Science, 346,* 838, 2014.
(4) A. Wyttenbach *et al., A&A, 577,* A62, 2015.
(5) A. Lecavelier des Etangs *et al., A&A,* 543, L4, 2012.
(6) D. Ehrenreich *et al., Nature, 522,* 459, 2015.

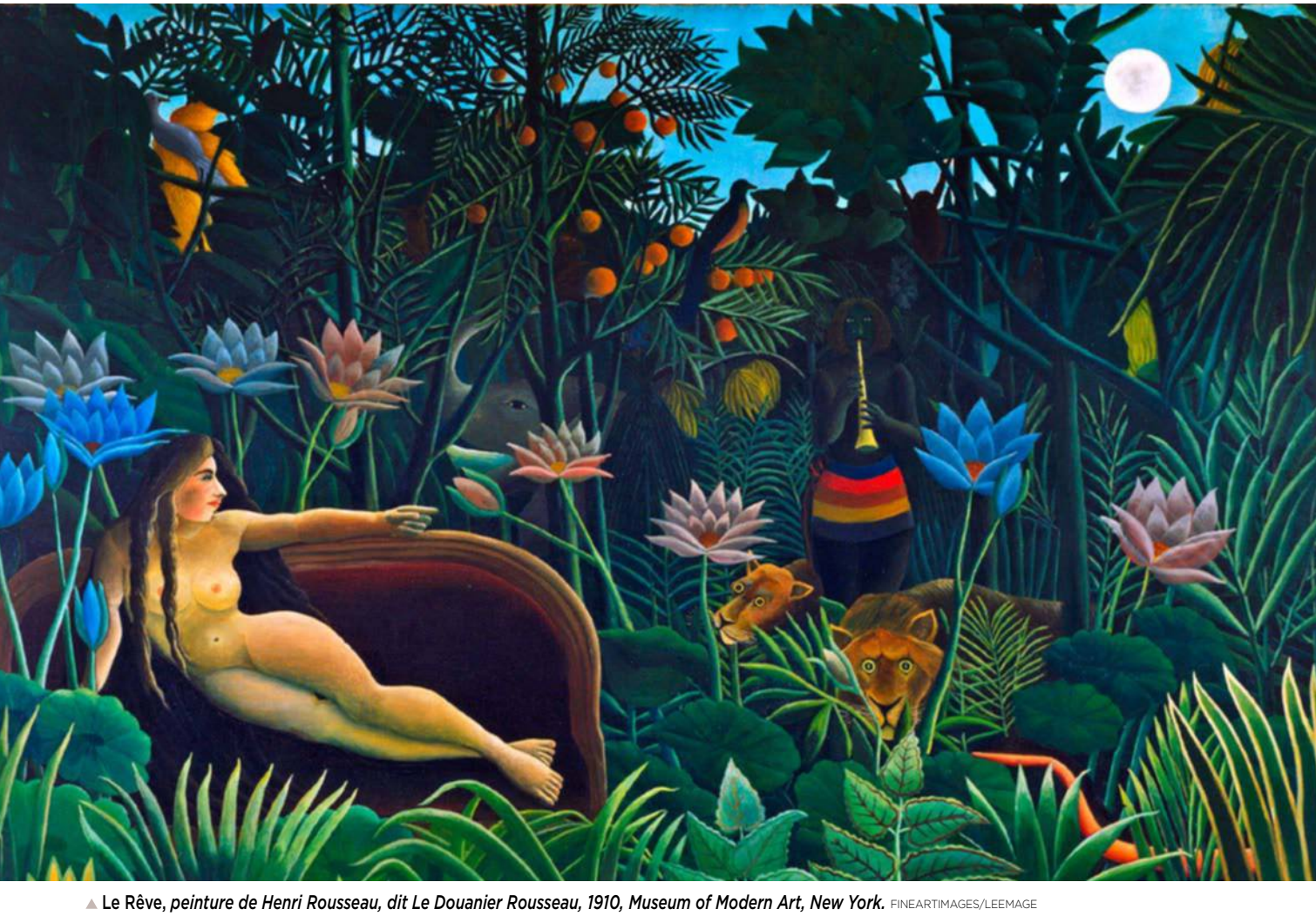
NASA/ESA/A.FEILD

4

Qu'est-ce qu'une planète habitable ?

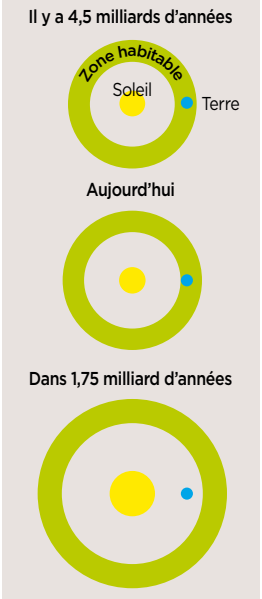
Où fait-il bon vivre dans l'Univers ? Faute de le savoir encore, quelques ingrédients se révèlent indispensables pour qu'une exoplanète puisse accueillir la vie : la présence d'eau liquide, d'une étoile à bonne distance, ou de carbone.

Vincent Glavieux, journaliste



▲ Le Rêve, *peinture de Henri Rousseau, dit Le Douanier Rousseau, 1910, Museum of Modern Art, New York.* FINEARTIMAGES/LEEMAGE

Fig. 1
Une zone habitable mouvante



▲ **Comme toute étoile, le Soleil devient de plus en plus lumineux au fil du temps, et dégage de plus en plus d'énergie. Cela entraîne l'éloignement de la zone habitable. La Terre, qui se trouvait au cœur de cette zone à ses origines, se rapproche de sa limite intérieure. Elle devrait en sortir d'ici à 1,75 milliard d'années environ.**

Gliese-581d, en 2007, Kepler-186f, en 2014, ou Kepler-452b, il y a quelques mois : voici le nom de trois planètes extrasolaires dont la découverte a fait grand bruit dans la communauté scientifique. La raison : il s'agirait d'exoplanètes potentiellement « habitables », comme les astrophysiciens n'en ont détecté qu'une poignée jusqu'à présent. Qu'entend-on par là ? *« Poser la question de l'habitabilité revient d'abord à poser la question de la vie »,* recadre le planétologue François Forget, de l'université Pierre-et-Marie-Curie, à Paris. Si certains, comme récemment l'astrophysicien britannique Stephen Hawking, rêvent de trouver une civilisation intelligente ailleurs dans l'Univers, la plupart des spécialistes ont un espoir plus raisonnable, celui de découvrir la vie sous une des formes que l'on connaît sur Terre : les micro-organismes. Où trouver cette forme de vie primitive ? Dans de l'eau liquide, répondent les mêmes spécialistes, en se référant à ce qui se passe sur notre planète, même si certains font preuve de plus d'imagination, et envisagent des conditions bien différentes de celles que nous connaissons (lire p. 47). Mais si la présence d'eau liquide est une condition primordiale, elle est loin d'être la seule. ■

Elle a de L'EAU À DISPOSITION

La condition unanimement reconnue comme nécessaire – mais pas suffisante – pour qu'une exoplanète puisse être déclarée habitable, est la présence d'eau liquide en permanence, comme c'est le cas sur Terre. L'eau constitue en effet un excellent solvant liquide. *« Elle a notamment une formidable capacité à former des liaisons hydrogène, indispensables pour constituer les molécules d'ADN par exemple »,* confirme François Forget. *A priori,* pour ce qui est de la présence d'eau elle-même, pas de problème : de nombreuses études, comme celle publiée en 2005 par José Cernicharo, du centre d'astronomie de Madrid, et Jacques Crovisier, de l'Observatoire de Paris, ont montré que notre Galaxie contient des molécules H_2O en abondance (1). Mais pour ce qui est de la présence d'eau à l'état liquide, c'est plus compliqué. *« À défaut, elle doit être récupérable sous cette forme »,* précise François Raulin, de l'université Paris-Est Créteil. Il peut alors s'agir, par exemple, d'eau issue de l'hydratation des minéraux – certains organismes qui vivent dans des endroits extrêmement arides sur notre planète, baptisés extrêmophiles, sont capables de la récupérer sous cette forme. *« Cela peut aussi être de la glace d'eau si, à un moment ou à un autre, celle-ci se transforme en perles d'eau liquide, que les micro-organismes peuvent collecter »,* poursuit l'exobiologiste. Par ailleurs, la présence d'eau liquide en permanence requiert des conditions de température et de pressions particulières. *« C'est une question de physique,* commente François Forget. *On sait que, pour avoir de l'eau liquide, la température doit être comprise entre 0 °C et le point d'ébullition, typiquement 100 °C sur Terre. La pression de l'eau doit être supérieure à ce qu'on appelle le point triple de l'eau (*), soit 6,1 millibars. »*

DES RIVIÈRES, DES LACS, DES OCÉANS

Autre caractéristique, dont certains scientifiques se sont servis pour définir plusieurs classes d'habitabilité (lire p. 45) : il faut que cette eau liquide se trouve de préférence à la surface de la planète, dans des rivières, des lacs, des océans. *« Il y a deux raisons à cela, si l'on s'en tient à ce que l'on connaît sur Terre,* explique Franck Selsis, de l'université de Bordeaux-I. *La première, c'est qu'il est ainsi plus facile pour les micro-organismes qui y vivent de rentrer en contact avec de la lumière, et donc de réaliser la photosynthèse, processus grâce auquel est formée la matière organique. »* La seconde raison, elle, sert uniquement les besoins des scientifiques : *« En surface, l'eau peut modifier l'environnement atmosphérique de manière plus détectable par nos instruments – satellites spatiaux ou terrestres »,* reprend l'astrophysicien. Un point non négligeable quand on sait que les exoplanètes potentiellement habitables que l'on a découvertes se situent au moins à plusieurs dizaines d'années-lumière de la Terre – Kepler-452b, par exemple, se trouve à 1 400 années-lumière de notre planète, soit plus de 13 millions de milliards de kilomètres !

Infographie : Maryvonne Marconville

La présence d'eau liquide en surface implique enfin que la planète se trouve dans la zone habitable de son étoile. *« Cette zone correspond à l'intervalle de distance entre une planète et l'étoile autour de laquelle elle orbite, de manière que la planète puisse avoir de l'eau liquide à sa surface »,* définit Franck Selsis. En résumé, si la planète se situe trop près de son étoile, on ne pourra pas y trouver d'eau liquide en surface : la température sera trop élevée, toute l'eau sera sous forme de vapeur. Inversement, si la planète est trop éloignée de son étoile, elle ne recevra pas assez d'énergie, et l'eau n'existera que sous forme de glace. *« C'est ce qui fait dire à certains spécialistes que la Terre est une miraculée,* commente François Forget. *Nous avons établi que si elle se situait à peine 5 % plus proche du Soleil, toute l'eau serait vaporisée ; quelques pourcents plus loin, elle serait victime d'une* "glaciation galopante", *à moins que l'atmosphère ne s'adapte pour réchauffer la surface par effet de serre. »*

Le travail de modélisation de la zone habitable, entrepris depuis quelques années, a par ailleurs permis d'établir que ces limites, et donc la position de la zone, sont variables. Ainsi, la taille de l'étoile a une incidence : si celle-ci est petite, comme Gliese-581 (trois fois plus petite que le Soleil), la zone d'habitabilité se situera plus proche d'elle que s'il s'agit d'une étoile géante, comme HR 8799 (un tiers plus grande que le Soleil).

La puissance émise par l'étoile sous forme de rayonnement a également un impact. *« Une étoile qui dégage énormément de rayonnement UV ou X va fortement chauffer la haute atmosphère de la planète. Il y a donc un risque que les molécules qui la composent se libèrent, que l'atmosphère se désagrège et que l'eau se vaporise »,* confirme Franck Selsis. Sachant qu'il y a, de ce point de vue, un autre élément à prendre en compte, à savoir l'évolution de la luminosité de l'étoile au cours de son histoire. *« Le Soleil, par exemple, est 40 % plus lumineux aujourd'hui qu'au moment de sa formation, il y a environ 4,5 milliards d'années, et 25 % plus lumineux qu'au moment où l'oxygène produit par photosynthèse a commencé à s'accumuler dans l'atmosphère de la Terre, il y a plus de 2 milliards d'années,* reprend l'astrophysicien. *C'est comme si la Terre était respectivement 20 % et 12 % plus loin du Soleil actuel. »* (Fig. 1)

À l'heure actuelle, et faute de moyens techniques suffisamment performants, les spécialistes ne sont pas encore en mesure de détecter la trace d'eau liquide sur une planète extrasolaire. Ils ont tout de même trouvé de la vapeur d'eau dans l'atmosphère de certaines d'entre elles : par exemple dans celle de HD 209458b, planète géante (220 fois la masse de la Terre) composée essentiellement de gaz (lire p. 40) ou dans celle de HAT-P-11b, planète similaire à Neptune (26 fois la masse de la Terre) (2).

BILAN Aucune exoplanète détectée à ce jour ne répond à ce critère. ■

(1) J. Cernicharo et J. Crovisier, *Space Sci. Rev., 119,* 29, 2005.
(2) J. Fraine *et al., Nature, 513,* 526, 2014.

●●●

(*) Le point triple de l'eau correspond aux conditions de température et de pression auxquelles l'eau coexiste dans ses trois états solide, liquide et gazeux, soit 0,01 °C et 6,1 millibars.

DES PLANÈTES PLUS OU MOINS ACCUEILLANTES

Il y a planète habitable et planète habitable. C'est ce qu'estiment les spécialistes, qui ont établi une classification des planètes à partir des connaissances actuelles sur la présence d'eau liquide.

CLASSE 1
Regroupe les planètes qui possèdent deux caractéristiques : les conditions stellaires et géophysiques rendant possible la présence permanente d'eau liquide en surface, et de la lumière pour réaliser la photosynthèse.
Modèle : la Terre.

CLASSE 2
Rassemble les planètes ayant autrefois possédé de l'eau liquide en surface qui, en raison de la dégradation de leurs conditions stellaires et géophysiques, n'auraient plus aujourd'hui que de l'eau liquide en profondeur.
Modèle : Mars.

CLASSE 3
On retrouve les objets situés trop loin de leur étoile, qui possèdent un océan d'eau liquide souterrain en interaction avec un cœur rocheux et volcanique. Sur ces planètes, il n'y a jamais eu de photosynthèse.
Modèle : Europe (satellite de Jupiter).

CLASSE 4
Un océan souterrain, coincé entre deux épaisses couches de glace, caractérise ces planètes. Faute d'interaction avec un volcan, il est pauvre en nutriments, rendant l'émergence de la vie difficile.
Modèle : Callisto (satellite de Jupiter).

NASA

Elle a une BONNE ÉTOILE

Des caractéristiques propres à l'étoile influent sur l'habitabilité d'une planète. Sa durée de vie, par exemple, joue un rôle. Et celle-ci dépend de sa masse : les étoiles qui ont une masse supérieure à 1,2 fois celle du Soleil ont une durée de vie bien plus courte que lui, et plus elles sont massives, plus celle-ci raccourcit rapidement. *« Cela signifie qu'elles vont émettre de l'énergie plus fortement, mais moins longtemps ; or la vie a besoin de beaucoup de temps pour émerger »*, complète André Maeder, astronome émérite à l'observatoire de Genève.

Il est aussi préférable que la planète orbite autour d'une seule étoile. Une situation pas si fréquente : les étoiles doubles représentent environ 60 % des étoiles, selon André Maeder. *« Au cours de son orbite, la planète se retrouve alors alternativement proche d'une étoile, puis de l'autre,* explique-t-il. *Cela entraîne des fluctuations, notamment de températures, trop dangereuses pour la vie. »*

Cela a conduit les astrophysiciens à privilégier l'étude de l'habitabilité autour de certains types d'étoile, en particulier les étoiles moyennement chaudes comprises entre la « classe F » et la « classe mi-K » (Fig. 2), qui constituent 5 à 10 % des étoiles de notre Galaxie. Mais ils gardent aussi un œil sur les étoiles de « fin de classe K » et de « classe M ». *« Elles sont plus petites et moins chaudes que le Soleil,* décrit François Forget, *mais bien plus nombreuses que les étoiles de type solaire, et plus faciles à observer. »*

BILAN Kepler-452b, détectée cette année, répondrait à ce critère. Son étoile *« possède la même température que le Soleil et un diamètre 10 % supérieur »*, selon la Nasa (1). ■

(1) J. M. Jenkins *et al.*, *ApJ*, *150*, 56, 2015.

Fig. 2
Les classes d'étoiles

▲ **La classification des étoiles est établie selon leur type spectral, qui correspond à une échelle de températures de surface (de la plus chaude, en bleu, à la plus froide, en rouge). Chaque classe est divisée, selon le même principe, en sous-classes numérotées de 0 à 9. Le Soleil, par exemple, se trouve dans la classe G2.**

Elle est solide COMME LA TERRE

Pour une planète, avoir une surface est indispensable à l'émergence de la vie, ce qui concerne les planètes d'une masse et d'une taille comparables à celles de la Terre. Ces planètes dites « telluriques » sont, comme notre planète, composées principalement de roches et de métaux. En revanche, cela exclut les planètes géantes gazeuses, comme Jupiter ou Neptune. *« Les molécules s'assemblent plus facilement quand la surface est solide, car il s'agit d'un milieu stable, à même de préserver un certain nombre de facteurs essentiels à la formation de liaisons chimiques, comme la température ; le problème avec un environnement uniquement liquide ou gazeux, c'est qu'il est constamment en évolution »*, justifie John Chambers, de la Carnegie Institution for Science, à Washington DC.

Le hic : avec les moyens d'observation actuels, il est parfois compliqué de distinguer une grosse planète tellurique d'une « mini-géante » gazeuse. *« Les exoplanètes dont la masse et le rayon sont compris entre ceux de la Terre et ceux de Neptune sont très communes,* confirme Franck Selsis. *Comme il ne semble pas y avoir de limites franches entre planètes telluriques et géantes gazeuses dans la population des exoplanètes, nous avons fixé une limite haute un peu arbitraire pour séparer les petites planètes avec surface des grosses planètes sans surface : dix fois la masse de la Terre, et deux fois son rayon. »*

NI TROP PETITE NI TROP LÉGÈRE

La planète ne doit pas non plus être trop petite et trop légère. Quand c'est le cas, comme pour Mercure (0,1 fois la masse de la Terre, et la moitié de son rayon), elles ont une gravité insuffisante. Conséquence : *« L'atmosphère y est extrêmement fine, la pression y est donc trop faible pour permettre de conserver de l'eau liquide en surface »*, résume François Forget. Par ailleurs, l'énergie interne de ce type de planète a tendance à s'échapper plus rapidement après sa formation. Or, sans énergie interne – celle de la Terre provient principalement de la désintégration d'éléments radioactifs au sein du manteau et de la croûte –, la planète ne peut pas fournir à l'eau en surface des éléments favorisant l'apparition et le maintien de la vie. Et elle n'est plus en mesure de

générer un champ magnétique pour protéger sa surface des rayons cosmiques.
La vitesse à laquelle la planète effectue une rotation sur elle-même, celle à laquelle elle accomplit un tour de son étoile, le degré d'inclinaison de son axe ou la forme de son orbite doivent aussi être suffisants. *« Une orbite très excentrique, par exemple, va entraîner des fluctuations importantes de température à la surface d'une planète, ce qui va forcément avoir un impact négatif sur sa capacité à abriter la vie »,* confirme Franck Selsis. Mieux vaut, donc, avoir une orbite la plus circulaire possible.
C'est le cas de la Terre : son excentricité est inférieure à 0,02, très proche du cercle parfait, dont l'excentricité est nulle. Celle de 951 exoplanètes a été mesurée (sur les 1950 découvertes, dernier chiffre au moment où nous écrivons ces lignes). En moyenne, elle est de 0,18. Pour 489 de ces planètes, l'excentricité de l'orbite dépasse 0,1, ce qui en fait de mauvaises candidates pour abriter la vie, selon certains spécialistes.
BILAN 8 exoplanètes, dont Kepler-452b, sont « semblable à la Terre », selon l'indice établi par l'université de Porto-Rico, à Arecibo (1). Cela signifie qu'elles ont obtenu un score supérieur à 0,8 ; les exoplanètes étant notées entre 0 – aucune similarité – et 1 – identique à la Terre. ■
(1) http://tinyurl.com/PHL-similarite-terre

Elle mise sur le CARBONE

Pour que la vie apparaisse, la planète doit aussi compter sur le carbone, qui permet notamment de garder des conditions climatiques stables et des océans liquides. Du moins, c'est le cas sur Terre, où il y contribue *via* certains mécanismes : effet de serre (*), volcanisme, précipitations.
De manière naturelle, le carbone est présent sur Terre sous forme de dioxyde de carbone (CO_2) et/ou de roche calcaire (carbonate) dans l'atmosphère, la croûte et le manteau. Ces différentes couches s'échangent le carbone : par exemple, quand les volcans entrent en éruption, ils dégazent du CO_2 dans l'atmosphère ; le CO_2 de l'atmosphère, lui, peut précipiter dans la croûte océanique, où il sédimente en carbonates, etc.
Imaginons maintenant que la Terre se refroidisse trop. Les volcans vont continuer à entrer en éruption, et donc à dégazer du CO_2. Mais, comme le froid ralentit les réactions chimiques, le CO_2 précipitera moins rapidement dans les océans. La concentration du CO_2 dans l'atmosphère va ainsi augmenter, provoquant son réchauffement et celui de la surface, jusqu'au dégel. À l'inverse, si la Terre se réchauffe, les réactions chimiques seront accélérées. Le CO_2 de l'atmosphère va être précipité plus rapidement, ce qui permettra de rafraîchir l'atmosphère et la surface de la planète, et de les faire revenir à une température où les océans ne se vaporiseront plus. Le carbone joue-t-il ce rôle de « thermostat » ailleurs que sur Terre ? Les multiples études théoriques déjà menées n'en ont pas apporté la preuve (1).
Par ailleurs, si la vie existe sur une autre planète, la plupart des spécialistes considèrent qu'elle doit être fondée sur la chimie du carbone. *« C'est l'élément le plus apte à former de longues chaînes moléculaires. Or ces chaînes sont nécessaires pour porter le code génétique de toute forme de vie »,* confirme André Maeder.

MOLÉCULES COMPLEXES

Reste que, pour le moment, on possède trop peu d'informations sur la composition chimique des exoplanètes. Certains, pour échapper à ce que l'exobiologiste américain Carl Sagan appelait le *« chauvinisme du carbone »* (2), imaginent donc d'autres possibilités, à base de silicium par exemple. *« Mais ces chimies ne permettent pas de créer des molécules aussi complexes,* insiste François Forget. *Et c'est vrai quelles que soient les conditions : par exemple, quand on regarde dans le milieu interstellaire, très défavorable à l'apparition de la vie, on s'aperçoit que la grande majorité des molécules, là encore, est à base de carbone. »*
BILAN La présence de carbone a été confirmée sous forme de molécules de carbone sur HD 209458b et sur HD189733b ; sous forme de monoxyde de carbone sur HD189733b, HD 179949 b et Beta Pictoris b ; sous forme de dioxyde de carbone dans HD189733b et HD 209458b (3). ■
(1) A. Lenardic et J. W. Crowley, *ApJ, 755,* 132, 2012.
(2) C. Sagan, *The Cosmic Connection,* Anchor Press, p.47, 1973.
(3) J. Bailey, *P.A.S.A., 31,* e043, 2014.

LA VIE AUTREMENT

Au début de l'année, une équipe américaine (1) a imaginé ce qui pourrait rendre habitables de petites exoplanètes gazeuses, les MiniNeptune, réputées inhospitalières malgré la profusion d'eau à leur surface, en raison de leur atmosphère composée d'hydrogène, d'ammoniac… Ainsi, pour que la vie apparaisse sur ce genre de planètes, la MiniNeptune doit se trouver dans la zone habitable de son étoile, sa masse ne doit pas excéder deux fois celle de la Terre et elle doit être soumise à d'importantes forces de marée. L'étoile, elle, doit être peu massive (0,075 à 0,4 fois la masse du Soleil), et sa température ne doit pas dépasser 3800 °C. Elle doit par ailleurs émettre de puissants rayonnements gamma et ultraviolets, seuls capables de nettoyer l'atmosphère de la planète de ses gaz hostiles à la vie.
(1) R. Luger *et al., Astrobiology, 15,* 57, 2015.

(*) **L'effet de serre** est un phénomène thermique où le rayonnement infrarouge émis par le sol est en partie ou totalement piégé par l'atmosphère, rendue imperméable par la présence de gaz, dont le CO_2.

5

La bible des exoplanètes

Tout ce que l'on sait aujourd'hui sur les exoplanètes est rassemblé dans l'Encyclopédie des planètes extrasolaires. Un site internet inclura bientôt le traitement des données scientifiques, ce qui en fera un précieux outil pour la communauté.

Par Jean Schneider, astrophysicien

Repères

- **Depuis 1995, Jean Schneider tient à jour l'Encyclopédie des planètes extrasolaires (exoplanet.eu).**
- **Base de données unique en son genre, mise à jour quotidiennement, le catalogue permet de faire des statistiques sur les données recueillies par les astronomes.**
- **On y trouvera bientôt des données scientifiques primaires, telles les courbes de lumière, que les astrophysiciens du monde entier pourront traiter.**

L'Encyclopédie des planètes extrasolaires est née de la conjonction de plusieurs éléments. Dans les années 1990, l'espoir était grand que l'on découvre à plus ou moins long terme une forme de vie. Un espoir né de la découverte en 1989 d'un objet – 114762 b – que l'on soupçonnait être une exoplanète, ce qui fut confirmé en 2012. Pendant la même période, une autre nouveauté arrivait : Internet. Pas de doute, le thème des exoplanètes était tellement important qu'il fallait favoriser l'émergence d'une communauté mondiale unifiée dans ce domaine. Tout cela a conduit à créer, sur le Web, dans un esprit de service public, l'Encyclopédie des planètes extrasolaires (exoplanet.eu).

À sa création, début 1995, très peu d'exoplanètes étaient connues, mais je les recensais quand même. De plus, il s'agissait d'objets assez différents de ce qu'on trouve dans le système solaire. Toutefois, les projets de détection de planètes se poursuivaient, des colloques étaient organisés. L'espoir que d'autres exoplanètes viennent s'ajouter à la liste restreinte était un peu fou, mais pas nul. C'est alors que, fin 1995, arriva l'annonce imprévue de la découverte de la planète 51 Peg b, par Michel Mayor et Didier Queloz, suivie bientôt par d'autres. Ce qui conforta ma démarche.

Aujourd'hui, le site contient essentiellement un catalogue de données sur environ deux mille planètes. Pour chacune d'elles, il comprend un maximum de caractéristiques, tels la masse, le rayon, la période orbitale, les propriétés de l'étoile parente, ainsi qu'une bibliographie complète, mise à jour quotidiennement (Fig. 1). Toutefois, il garde son caractère encyclopédique, avec une liste des projets, de 700 à 1 000 références ajoutées chaque année, une nouvelle annonce de colloque par semaine, ce qui en fait un site unique au monde. Une dizaine de chercheurs et d'informaticiens, sous la houlette de Françoise Roques et Pierre Le Sidaner, de l'Observatoire de Paris-Meudon, contribuent, parfois bénévolement, à la mise à jour et au développement du site.

TOUS LES OBJETS JUSQU'À 60 FOIS LA MASSE DE JUPITER

La constitution d'un tel catalogue pose la question des objets à y inclure. Mais comme il n'existe pas de définition officielle d'une exoplanète, il n'est pas possible de dire avec certitude si une planète donnée est confirmée ou non, ni, *a fortiori,* de donner à chaque instant le nombre exact de planètes découvertes. Notre choix a été d'être très large, et d'y inclure tous les objets jusqu'à 60 fois la masse de Jupiter, à l'erreur de mesure près (autrement dit, si l'incertitude est de 5, on inclut les astres de 65 masses de Jupiter).

L'un des intérêts du catalogue est la présence d'outils pour traiter ou visualiser en ligne cer-

Fig.1 La classification des exoplanètes

◀ Les astronomes disposent d'assez de données pour décrire et classer ces 1155 exoplanètes. Elles figurent avec 795 autres moins documentées dans l'Encyclopédie des planètes extrasolaires. Une référence devenue incontournable et dont la construction a commencé avec les premières découvertes.

(*) **Mterre** est l'abréviation de masse de la Terre et **MJupiter** de masse de Jupiter.

taines données. D'une part, pour chaque planète il y a un « prédicteur d'observabilité » qui permet aux observateurs d'estimer si la planète est visible directement avec leurs caméras et quand les observations sont optimales, un outil utile pour programmer les observations (1). D'autre part, le site contient des outils de visualisation des différentes caractéristiques, par exemple on peut obtenir un graphe de la masse des planètes en fonction de leur rayon, ou de la distance qui les sépare de leur étoile. En 2011, on a découvert grâce à ces outils que la taille des planètes géantes d'une masse donnée décroît en moyenne à mesure qu'elles s'éloignent de l'étoile, ce qui indique que la proximité de l'étoile à une influence sur cette taille (2).

D'autres sites institutionnels sont consacrés aux exoplanètes, ce qui permet d'éviter que la source d'information soit unique et inévitablement un peu biaisée. Cette multiplicité augmente aussi la diversité des outils et des catalogues de présentation. Ces sites sont surtout consacrés à des catalogues de planètes, très bien faits, mais moins complets, moins à jour et sans bibliographie exhaustive ni informations générales (projets instrumentaux, colloques). Quant à Wikipédia – qui puise d'ailleurs beaucoup de ses ressources dans exoplanet.eu sans le citer –, l'anonymat de ses contributeurs n'offre pas de garantie scientifique. Comment ce site va-t-il évoluer ? Il intégrera de nouveaux outils statistiques d'analyse et des logiciels en ligne. Surtout, un partenariat en cours de finalisation avec le consortium suisse PlanetS fournira à travers l'encyclopédie un accès en ligne aux données primaires (mesures de vitesses radiales, de courbes de transits, de spectres, etc.). Des données qui permettrontde déterminer des caractéristiques physiques et orbitales d'une planète, transformant le site en outil de travail précieux pour les astronomes à travers le monde. ■

(1) G. Schworer et P. Tuthill, *A&A, 578,* A59, 2015.

(2) J. Schneider *et al., A&A, 532,* A79, 2011.

CONCOURS

L'UNION ASTRONOMIQUE INTERNATIONALE propose de participer au choix des noms de 20 exoplanètes, en votant sur le site internet nameexoworlds.iau.org. avant le 31 octobre 2015.

Pour en savoir plus

La Recherche a publié

- Clément Delorme, « Une moisson de nouvelles planètes », mai 2014, p. 8.
- Philippe Pajot, « Jill Tarter : "La recherche de signaux extraterrestres est une question scientifique" », décembre 2013, p. 66.
- Philippe Pajot, « Exotiques atmosphères », juin 2008, p. 50.

Livres

- André Maeder, *L'Unique Terre habitée ?,* Favre, 2012.
- Pascal Bordé, *Y a-t-il d'autres planètes habitées dans l'Univers ?,* Le Pommier, 2004.
- Vincent Boqueho, *La Vie, ailleurs ?,* Dunod, 2011.

Sur le Web

- **tinyurl.com/conf-Maeder**
Une conférence publique d'André Maeder à l'Institut d'astrophysique de Paris sur « les multiples conditions pour l'habitabilité des planètes ».
- **http://tinyurl.com/radioMayor**
Michel Mayor raconte la découverte de la première exoplanète en 1995.
- **http://tinyurl.com/NASA-zone-habitable**
La Nasa met en ligne des leçons sur la notion de zone habitable destinées aux jeunes (en anglais).
- **tinyurl.com/phl-exoplanets**
Le catalogue des planètes habitables de l'université de Porto-Rico, à Arecibo (en anglais).
- **http://tinyurl.com/exoplanet-ipac-caltech**
Les données publiques de la Nasa sur les exoplanètes (en anglais).
- **http://tinyurl.com/backreaction-hunt-exoplanet**
Sur l'histoire de la recherche d'exoplanètes avant 1995 (en anglais).

exoplanet.eu/PHL@UPR Arecibo

DANS LES ANNÉES 1940

Prises depuis le Montenvers, au-dessus de Chamonix, ces deux photograpies mettent en évidence l'évolution spectaculaire de la mer de Glace. En soixante-quinze ans, le plus grand glacier français a reculé d'environ 1 kilomètre.

2015

Climat

SPÉCIAL COP21

La fin programmée des glaciers

L'augmentation de la température due au changement climatique aura des conséquences sur les glaciers de montagne. Dans quelle proportion ? C'est ce que les chercheurs tentent d'estimer grâce à des modèles.

Par Antoine Rabatel, glaciologue

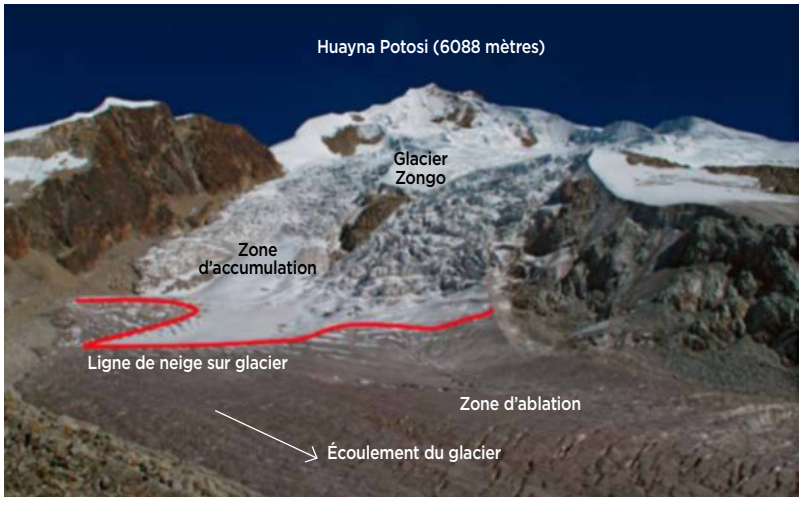
Verrons-nous les Alpes sans glacier d'ici à quelques décennies ? Et, au-delà de nos frontières, qu'adviendra-t-il des glaciers des Andes, de l'Himalaya, des Rocheuses, dans un contexte de changement climatique ? S'il est difficile de répondre précisément à cette question, leur recul ne fait pas de doute. Et une chose est sûre : les enjeux associés aux glaciers et à leur évolution sont nombreux, notamment à cause de la surface qu'ils représentent : quelque 700 000 kilomètres carrés à l'échelle de la Terre (soit environ la superficie de la France métropolitaine avec ses régions et territoires ultramarins), en dehors des calottes de l'Antarctique et du Groenland. Leur existence même est liée aux conditions climatiques. La présence d'un glacier est en effet conditionnée par deux processus : l'accumulation de neige, qui se transforme en glace, et la fonte de neige et de glace. Sur le plan scientifique, l'enjeu est de mieux appréhender ces processus et leurs évolutions grâce à des observations de terrain et par satellite, des expérimentations en laboratoire et de la modélisation. Les conséquences de la fonte des glaciers sont loin d'être négligeables pour les hommes, tant d'un point de vue économique que sociétal.

Au premier rang de ces conséquences, citons la hausse du niveau des mers. Le dernier rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Giec) datant de 2013 indique qu'entre 1900 et 2010, le niveau marin moyen à l'échelle globale s'est élevé de près de 20 centimètres. La contribution de la fonte des glaciers à cette élévation est d'environ 27 %, et jusqu'à 48 % si l'on ajoute l'apport des calottes du Groenland et de l'Antarctique. Pour le XXIe siècle, selon ce même rapport, cette montée des eaux devrait s'accélérer et atteindre entre 40 et 60 centimètres en moyenne, avec une contribution des glaciers (hors calottes polaires) de 15 à 35 %, suivant le scénario climatique considéré. Les répercussions de cette élévation sont multiples : érosion •••

Repères

- **Suivant le scénario climatique, l'eau issue de la fonte des glaciers pourrait contribuer de 15 à 35 % à la hausse des océans au XXIe siècle.**
- **Pour anticiper l'avenir des glaciers et limiter l'impact de ces changements, les scientifiques simulent leur évolution.**
- **Ils ont montré que d'ici à 2100, la surface de nombreux glaciers aura diminué d'au moins 50 %.**

SYLVAIN BESSON - JCHARLES HURAULT / ROGER-VOLLET



▲ *Sur le glacier Zongo, en Bolivie, les zones d'accumulation, où l'apport de neige est supérieur à la fonte, et d'ablation, où, au contraire, la fonte est plus importante, sont bien visibles. La fin de la zone d'accumulation est délimitée par la ligne de neige sur glacier (en rouge), ou ligne d'équilibre, qui permet d'estimer les variations de masse du glacier.*

••• accélérée des côtes, submersions permanentes, inondations plus fréquentes liées aux événements extrêmes (tempêtes, cyclones…), salinisation des eaux de surface et des nappes phréatiques (eau potable) du littoral, ou encore destruction d'écosystèmes côtiers.

Les glaciers de montagne constituent aussi une ressource en eau non négligeable pour le fonctionnement hydrologique des bassins-versants de montagne, *a fortiori* dans les régions tropicales où la forte saisonnalité des précipitations confère un rôle important aux glaciers pour le maintien du débit de base des cours d'eau lors de la saison sèche. Dans une étude récente (1), nous avons en effet montré que, durant la saison sèche, la contribution des glaciers au débit des rivières atteint presque 30 % à La Paz, la capitale bolivienne, qui compte plus de 2 millions d'habitants.

Parallèlement, les glaciers sont à l'origine d'aléas divers : vidange des lacs formés par la fonte du glacier (proglaciaires) ou formés à sa surface, de poches d'eau dans le glacier, coulées boueuses sur les volcans englacés résultant de la fonte partielle ou totale de la calotte glaciaire lors d'une éruption. La plupart sont en augmentation ; c'est notamment le cas des lacs proglaciaires qui se multiplient avec le retrait glaciaire contemporain.

Enfin, l'évolution des glaciers affecte la biodiversité. En haute montagne, les modifications du couvert végétal et forestier sont en partie liées au retrait glaciaire, dans la mesure où les espaces déglacés constituent des zones de colonisation ou de migration potentielles. Cette interaction entre le règne végétal et les glaciers fait de ces derniers un des acteurs de l'évolution de la biodiversité en montagne.

Pour anticiper l'avenir des glaciers et limiter l'impact de ces changements, les scientifiques disposent d'outils, comme la simulation. Un procédé complexe qui nécessite de maîtriser plusieurs paramètres. Il faut d'abord connaître les épaisseurs de glace. Une donnée qu'on ne peut pas obtenir sur l'ensemble d'un glacier avec des mesures de terrain, quelle que soit la méthode utilisée. En effet, certaines zones sont inaccessibles en raison de la topographie accidentée (crevasses, séracs). On réalise généralement des mesures le long de profils transversaux (*) ; les résultats permettent d'évaluer les épaisseurs dans les zones qui ne sont pas étudiées. Toutefois, il est également possible d'estimer les épaisseurs de glace à partir de données de surface : la pente du glacier, le bilan de masse (les gains et les pertes de masse du glacier) et la vitesse d'écoulement en surface pour quantifier le flux de glace, et des lois physiques et mécaniques qui régissent l'écoulement d'un glacier.

MODÉLISER L'ÉCOULEMENT DE LA GLACE

Les scénarios de l'évolution des variables climatiques issues des modèles climatiques globaux et régionaux permettent ensuite de simuler les gains et les pertes de masse de surface des glaciers pour les années ou les décennies futures. Pour cette simulation, il faut prendre en compte l'accumulation et la perte de neige et de glace, ce qui nécessite des observations de terrain sur le long terme, pour étalonner les modèles. C'est notamment dans cette optique que le service d'observation Glacioclim, géré par le laboratoire de glaciologie et de géophysique de l'environnement, à Grenoble, conduit des mesures sur des glaciers de référence dans différentes régions du monde comme les Alpes, les Andes, l'Himalaya et l'Antarctique. Autre paramètre à considérer, la dynamique d'écoulement : le flux de glace allant de la zone d'accumulation, où l'apport de neige est supérieur à la fonte permettant la formation de glace, vers la zone d'ablation, où la glace finit par disparaître, car la fonte est plus importante à l'apport.

L'écoulement d'un glacier peut être considéré comme ductile, c'est-à-dire capable de se déformer sans rompre, en première approximation. On peut dès lors modéliser la façon dont s'écoule la

(*) **Un profil transversal** est une coupe réalisée perpendiculairement au sens d'écoulement du glacier.

A.RABATEL

glace grâce aux équations de Stokes qui décrivent l'écoulement d'un fluide dit «newtonien» (c'est-à-dire dont la vitesse de déformation est proportionnelle à sa viscosité, comme l'eau). Le code numérique Elmer/Ice, mis au point au laboratoire de glaciologie à Grenoble, simule l'écoulement d'un glacier en résolvant ces équations en tout point d'un maillage 3D représentant le glacier. Ce type d'approche requiert un nombre important d'observations *in situ* pour ajuster certains paramètres. Or celles-ci sont trop peu nombreuses à l'échelle mondiale en raison des problèmes de logistique, de coûts et d'accessibilité. Aussi, des approches simplifiées (notamment *via* une approximation des équations de Stokes) sont nécessaires pour simuler l'écoulement des glaciers à l'échelle régionale ou mondiale.

Simuler correctement l'évolution future d'un glacier nécessite de prendre en compte les incertitudes dans les différentes étapes, et particulièrement celles associées aux modèles de climat et à la variabilité introduite par les différents scénarios climatiques, la qualité de la simulation des bilans de masse de surface, de la représentation des épaisseurs de glace et de leur répartition selon l'altitude. À cet égard, deux articles parus récemment dans les revues *Nature Geoscience* (2) et *Annals of Glaciology* (3) apportent un éclairage sur les méthodes utilisées et les résultats que l'on peut en attendre dans deux contextes différents. Dans le premier, Garry Clarke, de l'université de Colombie-Britannique, au Canada, et ses collègues ont simulé l'évolution des glaciers de l'ouest canadien pour le XXIe siècle afin de quantifier le rôle du retrait glaciaire sur l'évolution future du débit des cours d'eau. Dans cette région, les glaciers représentent environ 26 700 kilomètres carrés (à comparer aux 275 kilomètres carrés couverts par les glaciers à la fin des années 2000 dans les Alpes françaises). Il est par conséquent impossible de connaître les épaisseurs de glace et les bilans de masse de surface pour chaque glacier. Les auteurs ont alors mis au point un «modèle de glaciation régional» qui simule le bilan de masse de surface par une approche simplifiée fondée sur la température, le rayonnement solaire et les précipitations, et la dynamique d'écoulement du glacier *via* une simplification des équations •••

LE GLACIER LE PLUS...

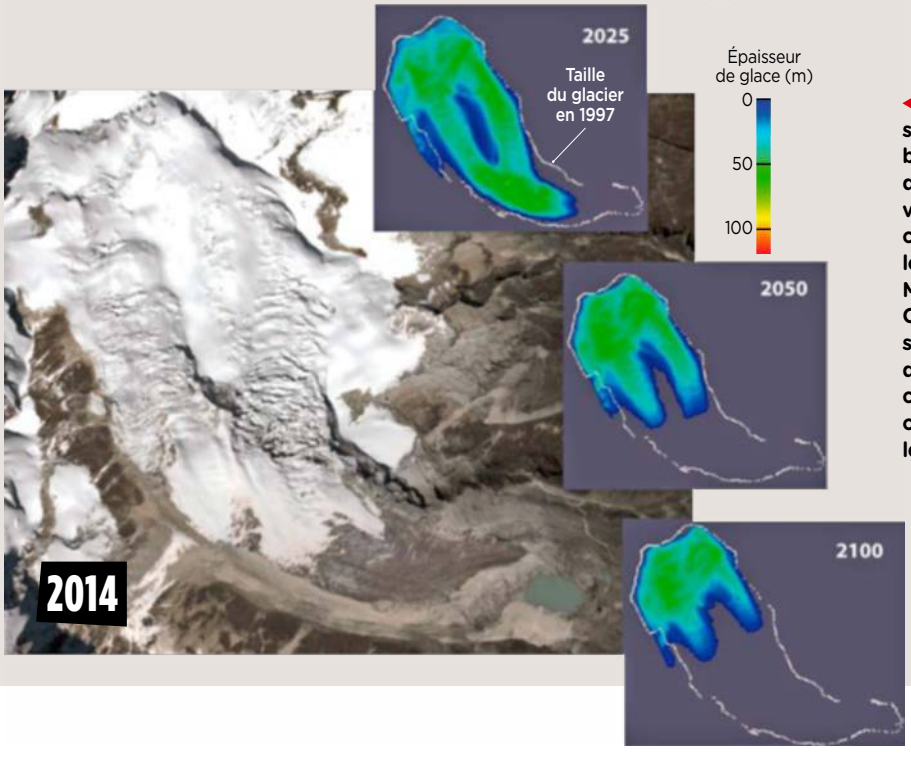
...LONG DU MONDE
Le glacier Lambert, en Antarctique : plus de 400 km. Il draine environ 8 % de la calotte antarctique, soit 1 million de kilomètres carrés (km²).

...GRAND DE FRANCE MÉTROPOLITAINE
La mer de Glace, dans le massif du Mont-Blanc, 12 km de long et 28 km².

...GRAND DES ALPES
Le glacier d'Aletsch, en Suisse, 23,6 km de long et 117,6 km².

... GRAND D'AMÉRIQUE DU NORD
Le glacier Bering, en Alaska, 190 km de long et 5200 km².

Fig. 1 Simulation de l'évolution future du glacier Zongo, en Bolivie



◂ Le glacier Zongo (image satellite, à gauche) a perdu beaucoup de sa superficie depuis 1997. Cette fonte va s'accélérer dans le futur comme le montrent les simulations réalisées par Marion Réveillet et ses collègues. Ces simulations se fondent sur un réchauffement climatique de +2 °C d'ici à la fin du siècle, ce qui correspond à l'objectif optimiste visé par les responsables politiques.

CNES/ASTRIUM

(*) **La ligne d'équilibre** est l'endroit où l'accumulation et la perte de neige et de glace se compensent.

••• de Stokes. Dans un premier temps, ils ont appliqué leur modèle sur le passé en imaginant la région vierge de toute glace au début de leur simulation, qu'ils ont placée en 1900. À l'aide des données climatiques du XXe siècle dont ils disposaient, ils ont ensuite « construit » et fait évoluer les glaciers au cours du siècle. Les surfaces englacées qu'ils ont ainsi obtenues pour le début du XXIe siècle ont été comparées à celles issues d'un inventaire des glaciers de la région réalisé en 2005 à partir d'images satellite. L'objectif : juger de la pertinence de leur approche et de la qualité de leurs simulations pour le XXe siècle, en les confrontant aux données réelles. Une fois leurs résultats validés, les auteurs ont simulé l'évolution future des glaciers en utilisant une approche d'ensemble qui prend en compte plusieurs modèles climatiques globaux et quatre scénarios climatiques différents plus ou moins pessimistes en termes d'évolution des températures pour la fin du XXIe siècle.

Il en ressort que, d'ici à 2100, 70 % des glaciers (avec une incertitude de plus ou moins 10 %) de cette région auront disparu. Les auteurs précisent que la fonte devrait s'accélérer dans les prochaines années, engendrant une hausse des débits des cours d'eau jusqu'en 2020-2040 suivant les massifs de la région. Après cette période, les surfaces glaciaires auront tellement diminué que la quantité d'eau provenant des glaciers diminuera peu à peu jusqu'à leur disparition, même si le taux de fonte annuelle continue à augmenter. Les glaciers disparus, le débit des cours d'eau ne dépendra plus que des précipitations et des réservoirs souterrains.

ÉLÉVATION DE LA LIGNE D'ÉQUILIBRE

Le second article porte sur le glacier Zongo, en Bolivie, suivi depuis 1991 à l'aide notamment de balises et de mesures GPS de précision, dans le cadre de Glacioclim. On dispose de mesures mensuelles de bilan de masse de surface, de mesures de la vitesse d'écoulement en surface et des épaisseurs de glace sur une large portion du glacier. La distribution du bilan de masse de surface est donc bien connue, ce qui a permis de simuler son évolution future à partir de la sensibilité de la ligne d'équilibre (*) à la température, la variable climatique la mieux simulée dans les modèles de climats. En outre, le modèle full-Stokes Elmer/Ice a pu être appliqué grâce à la connaissance des épaisseurs de glace et des vitesses d'écoulement en surface qui ont permis d'étalonner certains paramètres comme le frottement du glacier sur le socle rocheux sous-jacent. Dans cette approche, la plus grande incertitude sur l'évolution future du glacier résulte de la fiabilité des modèles climatiques à simuler l'évolution future des températures et sur les différents scénarios disponibles. Ainsi, suivant le scénario considéré, plus ou moins optimiste du point de vue de la hausse des températures, le glacier Zongo pourrait perdre de 40 à 90 % de son volume d'ici à 2100 (Fig. 1).

Plus proche de nous, dans les Alpes françaises, nous avons montré à partir d'images de satellite que l'altitude moyenne de la ligne d'équilibre se situait à près de 3 100 mètres (4), à la fin des années 2000. Cette altitude varie d'une centaine de mètres suivant l'orientation du glacier (plus haute en versant sud) ainsi qu'entre les massifs des Alpes du Sud (par exemple le massif des Écrins) et ceux des Alpes du Nord comme le massif du Mont-Blanc. Nous avons aussi constaté que la ligne d'équilibre s'était élevée de près de 170 mètres en moyenne au cours des trente dernières années (soit près de 6 mètres par an).

Si un tel rythme se maintient dans les prochaines décennies, elle se situerait en moyenne à 3 600 mètres d'altitude d'ici à la fin du siècle, entraînant un fort recul, voire une disparition complète de tous les glaciers des Alpes françaises situés sur des sommets d'altitude inférieure. Ainsi, il est fort probable que seuls le massif du Mont-Blanc et les plus hauts sommets des massifs de la Vanoise et des Écrins aient toujours des glaciers à la fin du siècle. Préciser la chronologie de l'évolution future des glaciers dans les Alpes françaises et notamment dans le massif du Mont-Blanc qui en concentre plus d'un tiers, fait l'objet d'un des axes de travail d'un projet de recherche financé depuis 2014 par l'Agence nationale de la recherche : le projet VItesses des Processus contrôlant les évolutions morphologiques et environnementales du massif du Mont-Blanc. Outre l'impact du retrait des glaciers dans ce massif pour la production d'hydroélectricité et le tourisme, c'est l'identité de ce massif, berceau de l'alpinisme mondial, qui est en danger. ■

(1) A. Soruco *et al.*, *Annals of Glaciology, 56*, 147, 2015.
(2) G. Clarke *et al.*, *Nature Geoscience*, doi: 10.1038/NGEO2407, 2015.
(3) M. Réveillet *et al.*, *Annals of Glaciology, 56*, 89, 2015.
(4) A. Rabatel *et al.*, *The Cryosphere, 7*, 1455, 2013.

Pour en savoir plus

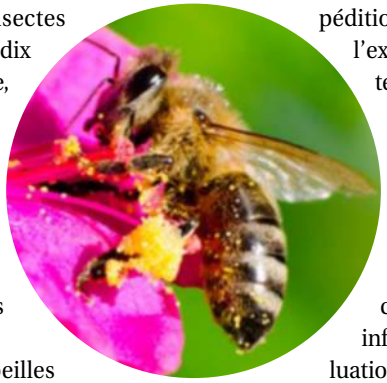
- **www-lgge.ujf-grenoble.fr/ServiceObs/index.htm** Le site du service d'observation Glacioclim.
- **http://vip-montblanc.osug.fr** Le projet de recherche VItesses des Processus contrôlant les évolutions morphologiques et environnementales du massif du Mont-Blanc.
- **www.elmerice.elmerfem.org** Le site du modèle Elmer/ICE
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, *Climate Change 2013 : The Physical Science Basis*, Cambridge University Press, 2014.

Abeilles recherchent experts désespérément

En raison d'un manque de spécialistes, l'évolution des populations de nombreuses espèces d'abeilles reste inconnue. Ces insectes symbolisent pourtant la perte de la biodiversité.

Denis Michez, taxonomiste, **et Pierre Rasmont,** zoologiste

La toute première liste rouge d'abeilles à l'échelle continentale a été publiée au début de l'année (1). Elle représente l'aboutissement d'un inventaire de toutes les espèces d'abeilles recensées en Europe et de leur statut (en déclin, stable ou en expansion). Un inventaire entrepris dans le cadre de l'un des deux projets d'envergure sur ces insectes emblématiques menés ces dix dernières années par l'Europe, le projet Step (Status and Trends of European Pollinators) (2), en collaboration avec l'Union internationale pour la conservation de la nature, une ONG spécialisée dans l'évaluation des risques d'extinction de la biodiversité. Au total, 1 965 espèces d'abeilles ont été recensées, dont 400 propres au continent européen. Toutefois, le résultat le plus marquant est probablement à chercher dans ce qui n'a pas pu être évalué : plus de la moitié des 1 965 espèces n'ont pas pu être correctement étudiées faute de données disponibles sur leur distribution, leurs populations (taille, fragmentation…), leur écologie ou même leur identification. Elles ont été classées dans la catégorie « Data deficient ». Pis, la tendance des populations n'a pas pu être évaluée pour plus de 80 % des espèces. Comment expliquer ce manque d'information ? Par un déficit criant de taxonomistes spécialisés dans les abeilles. Leur travail consiste essentiellement à étudier l'identification des espèces, leur morphologie, mais aussi leur ADN, leur écologie ou d'autres caractères. Pour cela, ils utilisent les collections historiques des musées et des institutions de recherche (centres nationaux de recherche, universités…) mais aussi leurs propres spécimens collectés au cours d'expéditions sur le terrain. À partir de l'expertise qu'ils acquièrent au terme de nombreuses années à étudier la diversité du groupe, autrement dit à « se faire l'œil », ils réalisent ce que l'on appelle des révisions ou encore des monographies. Ces monographies contiennent l'ensemble des informations nécessaires à l'évaluation de l'espèce, notamment sa distribution, son écologie ou encore son abondance relative. Michael Kuhlmann, chercheur au Muséum d'histoire naturelle de Londres, a récemment lancé un cri d'alarme à ce propos dans la revue *Nature* (3). Dans son article d'opinion « Expertise in Decline », il souligne que l'étude de la diversité des abeilles, c'est-à-dire leur taxonomie, est connue pour être particulièrement difficile par rapport à d'autres groupes d'insectes – leur morphologie peut être très similaire parmi les espèces d'un même genre, par exemple chez les bourdons. •••



VIKTOR KLAGYIVIK/SHUTTERSTOCK

Repères

■ 1965 espèces d'abeilles ont été recensées en Europe en 2015.
■ Mais la tendance des populations de plus de 80 % de ces espèces n'a pas pu être évaluée, à cause d'une insuffisance de données.
■ La raison : le manque de taxonomistes spécialisés dans les abeilles. Ils ne sont plus qu'une dizaine aujourd'hui en Europe.

▲ *Denis Michez, ici au cœur des collections entomologiques de l'université de Mons, en Belgique, a contribué à l'inventaire complet de la population des abeilles en Europe.*

••• Selon lui, de moins en moins de personnes sont capables de reconnaître les différentes espèces d'abeilles. Or ce travail est essentiel, notamment pour déterminer les spécimens conservés dans les musées, et ainsi définir les tendances des populations et des distributions.

DÉFICIT DE VOCATIONS

L'Europe présentait pourtant une des meilleures traditions en taxonomie. Au XVIII[e] siècle, le naturaliste suédois Carl von Linné, père de la taxonomie moderne, avait déjà commencé à étudier la diversité des abeilles. En France, les travaux des entomologistes Pierre-André Latreille et Amédée Louis Michel Lepeletier, publiés entre le XVIII[e] et le XIX[e] siècle, font toujours référence. Mais aujourd'hui, notre savoir se perd. Il reste à peine une dizaine de taxonomistes d'abeilles professionnels pour toute l'Europe et la plupart d'entre eux sont proches de la retraite. Heureusement, de nombreux amateurs éclairés aident les professionnels à établir les cartes de distribution et l'état des populations. Ainsi, en France, le dynamique Observatoire des abeilles se consacre à l'étude et à la protection de toutes les espèces d'abeilles sauvages et contribue à la diffusion des connaissances les concernant. Mais c'est très insuffisant au vu de la très grande diversité des abeilles, surtout dans le sud de l'Europe.

Comment expliquer ce déficit de vocations? Tout d'abord, la taxonomie est relativement mal soutenue en Europe par rapport aux États-Unis. Là-bas, la Fondation nationale pour la science possède des budgets pour financer de manière spécifique les recherches sur la biodiversité et la taxonomie. Ce n'est pas le cas en Europe. Résultat: il y a bien plus de taxonomistes professionnels aux États-Unis et la moyenne d'âge est plus faible, avec une nouvelle génération émergente. En Europe, les carrières de chercheurs en taxonomie sont aussi de plus en plus difficiles à réaliser.

Le curriculum vitae d'un chercheur est désormais évalué sur la base de la rapidité avec laquelle ses recherches sont citées dans les articles des confrères (le facteur d'impact). Or les articles en taxonomie sont très peu repris à court terme, au vu du peu de collègues à même de citer vos articles. En revanche, ils sont cités sur une période bien plus longue que les articles d'autres disciplines, durant des décennies, voire des siècles. Lorsqu'un taxonomiste décrit une nouvelle espèce, sa publication fait référence pour toujours. Il nous arrive de citer les travaux de Linné qui datent du XVIII[e] siècle. C'est rarement le cas dans d'autres disciplines comme les sciences biomédicales par exemple. De nombreux jeunes chercheurs en taxonomie se tournent alors vers des projets en écologie ou en biologie de la conservation, car les articles sont mieux cités et les revues plus prestigieuses.

Le déclin des abeilles est pourtant devenu un symbole. Utilisé par les médias, il permet de porter l'attention du grand public sur les risques de perte de la biodiversité à la suite des activités humaines. Si *Apis mellifera*, l'abeille domestique qui fait du miel et vit dans des ruches protégées par un apiculteur, est souvent la seule espèce

QUI ÉTUDIE CES INSECTES EN FRANCE?

Différentes institutions en France se consacrent à la taxonomie des abeilles. Elles regroupent amateurs de haut niveau et spécialistes de la faune française originaires de Belgique ou de Suisse: le réseau Apoidea Gallica et l'Observatoire des abeilles. L'écologie des abeilles sauvages est aussi étudiée à l'Inra, dans le laboratoire de Bernard Vaissière, et au CNRS, dans le laboratoire d'Isabelle Dajoz. Mais la taxonomie reste négligée. Les opérations de surveillance sont maintenant coordonnées par l'université de Mons, en Belgique, et le Muséum national d'histoire naturelle de Paris. Le plan national d'action lancé cette année par la ministre de l'Écologie Ségolène Royal pourra donner l'occasion de renforcer ces efforts.

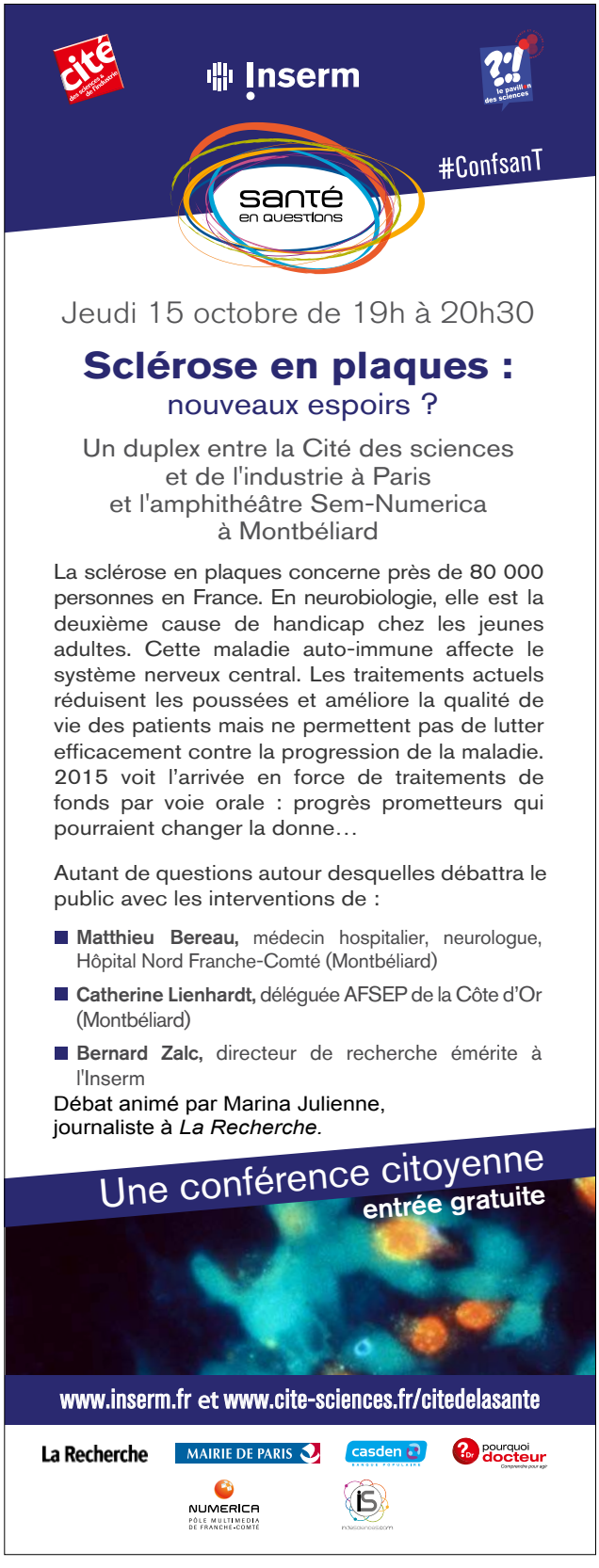
NICOLAS VEREECKEN

Le réchauffement climatique menace d'extinction 25 % des 68 espèces de bourdons recensées en Europe

connue, les abeilles représentent en fait une biodiversité énorme. Près de 20 000 espèces ont déjà été décrites dans le monde et l'Europe accueille près de 10 % de la diversité mondiale, alors qu'elle ne représente que 7 % de la surface des terres émergées. Pour donner un point de comparaison, les mammifères représentent moins de 5 500 espèces dans le monde, et l'on compte seulement 10 000 espèces d'oiseaux. La diversité des espèces d'abeilles est donc nettement supérieure à la diversité des mammifères et des oiseaux réunie !

RISQUES DE DISPARITION VARIABLES

Les abeilles sont essentielles à la pollinisation de la grande majorité des angiospermes, c'est-à-dire les plantes à fleurs. Sans elles, la reproduction sexuée de nombreuses plantes sauvages et cultivées, donc la production de fruits et de graines, seraient limitées ou même impossibles. Les animaux, y compris l'homme, qui dépendent de ces mêmes plantes, seraient très rapidement touchés. C'est donc toute la chaîne alimentaire des écosystèmes qui serait perturbée par leur disparition.
Cependant, les résultats de l'évaluation des risques d'extinction sont très variables selon les groupes d'abeilles. Le groupe le plus en danger est clairement celui des bourdons. Sur les 68 espèces recensées sur le continent européen, 25 % sont en danger d'extinction, et la majorité des espèces présente des populations en déclin. Ces bourdons sont notamment plus affectés par le réchauffement climatique global et les vagues de chaleur que les autres espèces d'abeilles (4). En effet, de nombreuses espèces de bourdons ont leur distribution restreinte aux montagnes et ne peuvent pas monter indéfiniment en altitude pour conserver leur optimum climatique. D'autres groupes, visiblement moins nombreux, comme les abeilles charpentières (du genre *Xylocopa*) sont au •••



••• contraire en expansion et semblent profiter du réchauffement climatique en s'étendant vers le nord. Pour elles, pas de souci notable dans un futur proche.

Néanmoins, de nombreuses incertitudes subsistent. Seule l'émergence d'une nouvelle génération européenne de chercheurs en taxonomie, dans les universités et dans les musées, permettra de définir clairement les distributions des différentes espèces d'abeilles et la tendance de leurs populations en Europe. Et ce constat peut bien sûr être élargi à d'autres insectes, comme les mouches. De nombreuses informations sont déjà disponibles dans les différentes collections des musées européens, mais les moyens manquent pour les numériser et les rendre accessibles. Cette première étape d'état des lieux de la biodiversité est essentielle pour pouvoir établir dans un second temps des politiques de conservation efficaces pour toutes les abeilles en Europe. Nous pourrons ainsi préserver le service écosystémique indispensable, c'est-à-dire les bénéfices tirés du fonctionnement d'un écosystème, que ces charmantes abeilles réalisent avec leur élégante efficacité. ■

(1) A. Nieto *et al.*, *European Red List of Bees*, Publication Office of the European Union, 2015.

(2) S. Potts *et al.*, *Status and trends of European pollinators. Key findings of the STEP project*, Pensoft Publishers, Sofia, 2015.

(3) M. Kuhlmann, *Nature, 521*, 558, 2015.

(4) P. T. Kerr *et al.*, *Science, 349*, 177, 2015.

20 000

ESPÈCES D'ABEILLES environ ont déjà été décrites dans le monde, contre moins de 5 500 espèces de mammifères et 10 000 espèces d'oiseaux.

Pour en savoir plus

■ M. Terzo & N. Vereecken, *Un jardin pour les abeilles sauvages. Comment les accueillir, les observer et les protéger*, SPF Santé publique, Sécurité de la chaîne alimentaire & Environnement, Bruxelles, 2014.

▲ *Cette estampe, qui représente différentes espèces d'abeilles, est extraite d'un ouvrage du XVIII^e siècle se basant sur le travail de Carl von Linné, naturaliste suédois de cette époque et père de la taxonomie moderne.*

Museum national d'Histoire naturelle, distr. RMN-Grand Palais/Image MNHN, Bibl.centrale

SIX FAMILLES EN EUROPE

En Europe, six familles d'abeilles ont été recensées. La plus connue est celle des *Apidae*. Mais il en existe cinq autres, qui rassemblent des espèces sauvages et solitaires, généralement beaucoup plus discrètes :

■ LES *APIDAE* sont la famille la plus diversifiée avec 561 espèces en Europe. Elle comprend l'abeille mellifère et les bourdons.

■ LES *MELITTIDAE*, 37 espèces en Europe, regroupent des abeilles qui ont la particularité d'être spécialisées d'un point de vue alimentaire. Chaque espèce de *Melittidae* est donc associée à sa plante préférée. Par exemple, l'abeille *Melitta nigricans* est liée à la salicaire. Si celle-ci disparaît, cette abeille disparaît aussi, car elle est incapable de se nourrir du pollen ou du nectar d'autres plantes. Les espèces spécialistes sont donc généralement plus sensibles aux perturbations des écosystèmes.

■ LES *MEGACHILIDAE* sont relativement diversifiées avec 441 espèces en Europe. Elles sont solitaires et ont la particularité de transporter le pollen grâce à une brosse située sous l'abdomen. Elles sont surtout connues pour leurs modes de nidification très variés. Certaines espèces nichent dans des tiges creuses qu'elles tapissent de morceaux de feuilles ou de pétales qu'elles découpent directement sur les plantes. Elles sont d'ailleurs surnommées les abeilles « coupeuses de feuilles ». D'autres espèces nichent même dans les coquilles d'escargot vides !

■ LES *ANDRENIDAE* sont surtout représentées en Europe par le genre *Andrena* (413 espèces). Les andrènes peuvent être remarquées par les grosses agrégations de nids que certaines espèces comme l'andrène vague *(Andrena vaga)* réalisent dans les zones sableuses. Toutes ces espèces nidifient dans le sol en creusant des galeries.

■ LES *COLLETIDAE* sont représentées par 141 espèces en Europe mais sont beaucoup plus diversifiées en Australie et en Amérique du Sud. Il y a deux genres connus pour cette famille sur notre continent : *Colletes* et *Hylaeus*. Certaines de ces espèces peuvent être spécialisées sur des fleurs en particulier, comme le collète du lierre qui récolte essentiellement du pollen sur le lierre à partir de la fin de l'été.

■ LES *HALICTIDAE* sont connues pour leur niveau de socialité variable et complexe. Certaines espèces sont sociales, comme les abeilles mellifères. D'autres sont totalement solitaires ou encore cleptoparasites : elles pondent leurs larves dans les nids conçus par d'autres espèces d'abeilles, comme l'abeille coucou. Enfin, certaines espèces sont parfois solitaires, parfois sociales, en fonction des conditions environnementales.

Les neurones communiquent grâce à la lumière

Une méthode mélangeant génétique, optique et chimie mime l'effet des neuromédiateurs, molécules clés du cerveau, sans les utiliser. Un travail qui a reçu le prix La Recherche en 2014.

par Thomas Grutter, biochimiste, **et Alexandre Specht,** chimiste organicien

Le cerveau, certainement l'organe le plus complexe et le plus mystérieux de notre corps, est constitué d'environ 80 milliards de neurones, qui échangent au niveau des synapses, connexions qui les relient entre eux, de petites molécules appelées neuromédiateurs. Ces messagers chimiques véhiculent aux neurones voisins des informations indispensables au bon fonctionnement du cerveau. Mais parfois certains jouent un rôle dans le développement de maladies neurologiques graves, comme la maladie d'Alzheimer, l'épilepsie ou les douleurs neuropathiques – qui surviennent lors de maladies comme le cancer ou le diabète et dont souffrirait une personne sur treize en France.

Des développements technologiques récents, à la croisée de l'optique, de la génétique et de la chimie, rendent possible une étude plus approfondie du rôle de ces neuromédiateurs. Au sein de notre laboratoire de l'université de Strasbourg, nous avons ainsi mis au point très récemment une nouvelle méthode. Grâce à elle, nous donnons l'ordre aux neurones de s'activer ou de s'inactiver à volonté sans recourir aux neuromédiateurs, mais en utilisant un petit interrupteur moléculaire commandé à distance par une simple irradiation lumineuse.

D'ordinaire, les neuromédiateurs sont stockés dans les neurones, à l'intérieur de petites poches baptisées vésicules présynaptiques. C'est à la suite d'impulsions électriques qui se propagent le long d'un neurone donné qu'ils sont libérés dans la fente synaptique, espace microscopique séparant les deux neurones. Ils se diffusent alors très rapidement pour se fixer, comme une clé dans une serrure, à des récepteurs localisés sur le neurone postsynaptique, situé en aval de la synapse. La fixation de ces neuromédiateurs modifie la structure des récepteurs. Cela conduit, chez certains d'entre eux, à l'ouverture d'une porte qui contrôle le passage des ions, molécules chargées positivement ou négativement, au travers d'un conduit appelé canal ionique. Le flux d'ions déclenche une série de réactions en chaîne dans le neurone postsynaptique, qui assurent la propagation de l'influx nerveux du neurone au suivant. Lorsque les neuromédiateurs se détachent de leur récepteur, le canal se referme, le flux d'ions s'arrête et le signal s'interrompt (Fig. 1).

PROTÉINE D'ALGUE

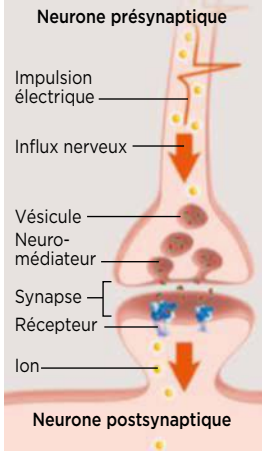
C'est en tentant de mieux comprendre le rôle spécifique de certains neurones responsables d'un comportement donné que l'équipe de Karl Deisseroth, à l'université de Stanford, aux États-Unis, en collaboration avec celle d'Ernst Bamberg, de l'institut Max-Planck à Francfort, en Allemagne, a réussi en 2005 un tour de force : ils ont inventé une nouvelle technique rendant possible l'activation à distance de neurones précis sans recourir aux neuromédiateurs (1).

Le principe ? Ils ont inséré dans le génome d'une souris le gène d'une algue unicellulaire, *Chlamydomonas reinhardtii,* qui code une •••

Repères

- **Les neurones utilisent les neuromédiateurs pour transférer l'influx nerveux entre eux.**
- **Les neuromédiateurs peuvent jouer un rôle dans le développement de maladies neurologiques graves ou de douleurs chroniques.**
- **Grâce à un interrupteur moléculaire commandé à distance par irradiation lumineuse, la communication entre les neurones est établie sans passer par les neuromédiateurs.**

Fig. 1 La communication neuronale



▲ **Lorsque l'on envoie des impulsions électriques dans le neurone présynaptique, les neuromédiateurs, stockés dans des vésicules, sont libérés dans la synapse. Ils se diffusent alors très rapidement et se fixent à des récepteurs localisés sur le neurone post-synaptique. Cela conduit, chez certains récepteurs, à l'ouverture d'un canal dans lequel peuvent passer des ions. Ce flux d'ions déclenche des réactions en chaîne dans le neurone postsynaptique, qui assure la propagation de l'influx nerveux.**

••• protéine naturellement sensible à la lumière, la channelrhodopsine. Au cœur de la protéine se loge une petite molécule, le rétinal, qui a la possibilité de changer de forme sous l'action de la lumière, ce qui bouleverse la structure de la channelrhodopsine. Elle se transforme momentanément en canal ionique, laissant passer le flux d'ions nécessaire à la vie de l'algue. Ainsi, le neurone qui exprime cette protéine devient lui-même sensible à la lumière.

Puis les chercheurs ont illuminé les neurones modifiés par une lumière bleue, d'une longueur d'onde de 450 nanomètres, grâce à une fibre optique implantée dans le cerveau des rongeurs. Ils ont réussi à activer uniquement les quelques neurones ayant fabriqué cette protéine et ont étudié quelle fonction comportementale de la souris était associée à l'activation de ces neurones.

Cette technique est nommée optogénétique car elle allie la génétique et l'utilisation de la lumière (du grec *optikós* pour « vision »). Elle a fait ses preuves en neurosciences : on a notamment pu identifier les groupes de neurones responsables de la mémoire dans le cerveau. Mais elle repose sur l'utilisation d'une protéine d'algue qui n'a rien à voir avec le fonctionnement du cerveau des mammifères. Bien qu'elle puisse identifier les neurones à l'origine d'un comportement donné, elle ne permet pas d'étudier la contribution d'une protéine spécifique, propre à la souris, à une fonction donnée.

COMMANDE À DISTANCE

Un nouveau développement était donc nécessaire. Il prend sa source au même moment à l'université de Californie, à Berkeley. Trois chercheurs, Dirk Trauner, Richard Kramer et Ehud Isacoff, élaborent une technique dérivée qui combine chimie, génétique et lumière : l'optogénétique pharmacologique (2). L'idée : rendre artificiellement sensibles à la lumière les récepteurs canaux par le biais de leurs neuromédiateurs. Les chercheurs ont modifié la structure chimique d'un neuromédiateur, le glutamate. Ils lui ont pour cela greffé deux accroches. La première est un maléimide, une accroche moléculaire capable de créer une liaison chimique irréversible avec son récepteur, afin d'empêcher que le glutamate ne diffuse loin de son site. La seconde est un dérivé d'azobenzène, une molécule connue des chimistes organiciens depuis plus de soixante-quinze ans et dont la géométrie varie en fonction de la lumière, comme le rétinal.

Grâce à des excitations lumineuses, les azobenzènes peuvent en effet se plier et se déplier. La structure dépliée (forme *trans*) est obtenue grâce à une irradiation par de la lumière verte de 500 nanomètres de longueur d'onde. La structure pliée (forme *cis*) nécessite, elle, une irradiation dans le proche ultraviolet, à une longueur d'onde de 360 nanomètres environ. Cette propriété remarquable permet de contrôler précisément la position dans l'espace du neuromédiateur. Quand on éclaire l'accroche d'azobenzène avec de la lumière verte, celle-ci se déplie et provoque l'entrée du neuromédiateur de glutamate – sur lequel elle est greffée – dans son site récepteur, et l'ouverture du canal ionique. À l'inverse, quand on éclaire l'accroche avec de la lumière violette, elle se replie, le glutamate sort de son site récepteur et le canal ionique se ferme.

Mais encore fallait-il trouver où attacher chimiquement la sonde azobenzène-glutamate sur le récepteur, car l'accroche azobenzène-maléimide sort du site de liaison un peu comme un bras qui explore la surface de la protéine. Les chercheurs ont utilisé la diffraction aux rayons X pour déterminer les structures cristallographiques d'un fragment du récepteur. Cette technique dévoile à l'échelle atomique la structure tridimensionnelle d'une molécule, ce qui leur a permis de déterminer le bon site.

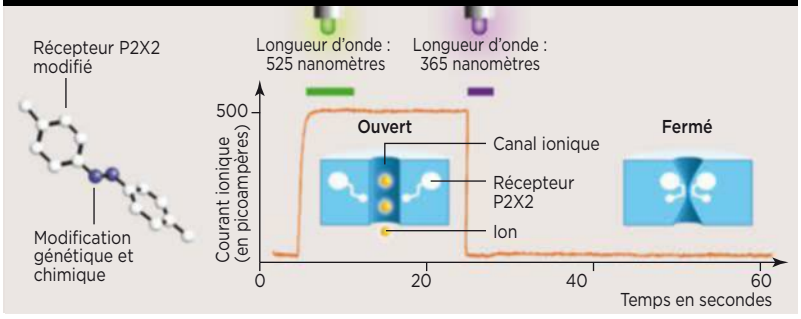
L'équipe a aussi déterminé que, pour que la sonde azobenzène-glutamate s'attache, il faut que ce site contienne un acide aminé particulier : la cystéine. Afin de l'obtenir, les chercheurs ont délaissé la chimie pour la génétique. Ils ont modifié la séquence d'ADN du gène qui permet de produire le récepteur du glutamate. Lors de la fabrication de la protéine par les neurones, l'acide aminé identifié sur la structure tridimensionnelle du récepteur est ainsi remplacé par une cystéine, capable de créer la liaison chimique avec le maléimide de la molécule azobenzène-glutamate.

Ainsi, en fonction de la longueur d'onde lumineuse, l'azobenzène-glutamate lié au récepteur agit comme un interrupteur moléculaire, qui active ou inactive le récepteur. Il est alors possible de cibler les récepteurs au glutamate avec une très grande résolution spatiale et temporelle.

Après ce premier succès, la technologie de l'optogénétique pharmacologique a été étendue à

Infographies : Sylvie Dessert

Fig. 2 Un interrupteur moléculaire



▲ **Des récepteurs P2X2 de neurones sont modifiés génétiquement et chimiquement pour devenir sensibles à la lumière. Quand on les illumine avec de la lumière verte de 525 nanomètres de longueur d'onde, leur structure se modifie : ils se déplient, ce qui provoque l'ouverture du canal ionique et la propagation de l'influx nerveux. Dès qu'on les éclaire avec de la lumière violette de 365 nanomètres de longueur d'onde, ils se replient, ce qui déclenche la fermeture du canal ionique et arrête la propagation de l'influx nerveux.**

d'autres récepteurs aux neuromédiateurs, comme les récepteurs nicotiniques. Mais une famille de récepteurs canaux appelés récepteurs purinergiques de type P2X, constituée de sept membres (P2X1 à P2X7) chez les mammifères, n'avait pas encore été testée. Ces récepteurs sont activés par un neuromédiateur particulier, l'ATP, connu pour fournir l'énergie nécessaire aux réactions biochimiques des cellules vivantes.

DOULEURS NEUROPATHIQUES

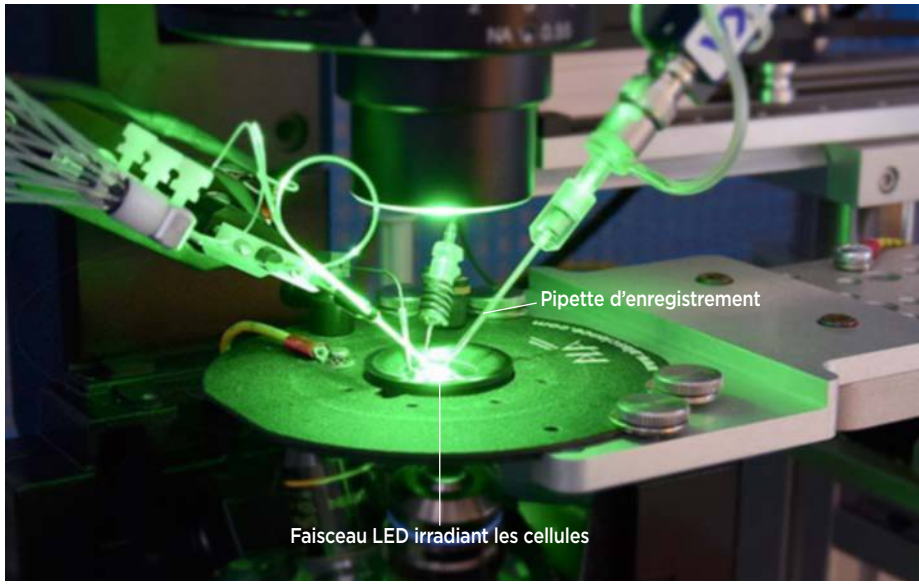
Au sein de notre équipe, à Strasbourg, nous travaillons depuis plusieurs années sur les aspects moléculaires des récepteurs P2X. Sur le plan de la physiologie, de nombreuses études internationales ont récemment montré leur implication dans le développement de processus inflammatoires qui conduisent, dans certains cas, à des pathologies invalidantes, comme les douleurs neuropathiques (3). Mais aucun traitement n'existe. Pour mieux comprendre le rôle fondamental des récepteurs P2X dans l'organisme, et notamment dans la communication neuronale, nous avons voulu les rendre artificiellement sensibles à la lumière (4). Ce travail a été l'objet d'une thèse défendue par Damien Lemoine en 2013, épaulé par une autre doctorante du laboratoire, Chloé Habermacher.

Dans un premier temps, nous avons cherché à utiliser l'approche d'optogénétique pharmacologique. Mais malgré plus d'un an et demi de travail intensif, nous n'avons pas réussi à fabriquer une molécule d'ATP greffée à l'azobenzène munie d'une accroche moléculaire. Visiblement, la création de cette clé spéciale allait demander encore de long mois d'effort de synthèse chimique. Nous avons alors décidé de changer de stratégie, en délaissant le système clé/serrure pour focaliser nos recherches sur la porte qui contrôle le passage des ions au travers du canal P2X. L'idée était de fixer une molécule d'azobenzène à proximité de cette porte, de sorte que le changement de forme induit par la lumière mime la modification de structure qu'induit naturellement l'ATP.

Nous avons d'abord modifié génétiquement le récepteur P2X2 de rat, l'un des récepteurs P2X les plus étudiés par la communauté scientifique. Nous y avons remplacé un par un certains acides aminés de la protéine situés à proximité de la porte du canal par des cystéines. Ce choix a de nouveau été guidé par des travaux récents. Nous avons ensuite montré que la modification génétique du récepteur n'entraîne pas de bouleversements de la fonction de celui-ci, condition indispensable pour créer notre outil. Puis nous avons fabriqué des molécules d'azobenzène simples, possédant un maléimide nécessaire pour créer la liaison chimique avec les cystéines introduites.

Enfin, pour tester l'effet de ces molécules, nous avons utilisé une méthode qui mesure en direct le flux d'ions au travers de cette porte. Cette technique, appelée électrophysiologie •••

▼ *La technique de l'électrophysiologie patch-clamp enregistre des courants ioniques de l'ordre du picoampère (10^{-12} ampère) grâce à une pipette en contact avec la membrane de la cellule. Couplée à un système d'irradiation par LED, elle permet d'identifier en direct l'ouverture et la fermeture du canal ionique.*



TGRUTTER-DLEMOINE/LABORATOIRE DE CONCEPTION ET APPLICATION DE MOLÉCULES BIOACTIVES

••• patch-clamp, enregistre des courants ioniques jusqu'au millième de milliardième d'ampère (soit 10^{-12} ampère) grâce à une électrode – ou pipette – de verre dont l'extrémité ultrafine, d'environ un micromètre de diamètre, est en contact direct avec la membrane de la cellule.

Cette opération ne peut pas se faire à la main, ni à l'œil nu : il faut utiliser un appareil de haute précision qui permet de guider sous un microscope la « pointe » de la pipette au micromètre près. Pour synchroniser l'ouverture des canaux avec les enregistrements de courants ioniques, nous avons adapté notre appareil de patch-clamp à un système d'irradiation par LED, dont les faisceaux lumineux émettent soit à 365, soit à 525 nanomètres de longueur d'onde.

Nous avons identifié plusieurs endroits sur le récepteur qui, après modification chimique, ouvrent ou ferment la porte du canal en fonction de la longueur d'onde d'irradiation. Pour l'un d'entre eux, les résultats ont été spectaculaires : une irradiation lumineuse à 525 nanomètres, pendant quelques secondes, permet d'ouvrir la porte du canal ionique et, en éteignant la lumière, la porte reste ouverte. Alors qu'une impulsion courte de lumière à 365 nanomètres la referme aussitôt, jusqu'à ce qu'on lui donne l'ordre de se rouvrir (Fig. 2).

Un examen précis des caractéristiques biophysiques du canal ionique nous a permis de conclure qu'il laissait passer le même type d'ions que le récepteur P2X2 non modifié : nous avions inventé un nouveau système qui mime l'effet de l'ATP sans y recourir. Mieux, nous avons montré que la porte s'ouvre et se ferme à distance grâce à notre dispositif, même si la serrure, le site de fixation de l'ATP, a été « détruite » génétiquement.

En collaboration avec François Rassendren et Pierre-François Méry, de l'Institut de génomique fonctionnelle à Montpellier, nous avons finalement appliqué notre technique à des neurones de rat en culture. François Rassendren a produit dans ces neurones le récepteur P2X2 sensible à la lumière et Pierre-François Méry a enregistré les courants ioniques consécutifs aux irradiations à 365 et 525 nanomètres. Nous avons ainsi fait la preuve que nous pouvions contrôler l'activité de ces neurones *in vitro* grâce à notre interrupteur moléculaire commandé à distance.

Le développement d'un récepteur P2X sensible à la lumière ouvre des perspectives. L'objectif ? Le tester sur une souris dont les récepteurs P2X impliqués dans les voies de la douleur chronique – les récepteurs P2X4 – seront remplacés par ceux rendus artificiellement sensibles à la lumière. Il sera ainsi possible de mimer l'action de l'ATP en activant sélectivement, par une impulsion lumineuse, à l'endroit et à l'instant voulus, les neurones qui vont déclencher la transmission de l'influx douloureux. C'est un travail lourd et fastidieux, mais les retombées scientifiques peuvent être nombreuses. Comme il existe différentes formes de récepteurs P2X dans le cerveau, notre outil permettra de savoir lesquels sont activés dans le cas de douleurs neuropathiques, et nous pourrons alors décortiquer la cascade biochimique qu'ils ont déclenchée. À terme, nous espérons que ces recherches permettront d'identifier de futurs médicaments contre les douleurs neuropathiques. ■

(1) E.S. Boyden *et al., Nat. Neurosci., 8*, 1263, 2005.
(2) M. Volgraf *et al., Nat. Chem. Biol., 2*, 47, 2006.
(3) G. Burnstock, *Nat. Rev. Drug Discov., 7*, 575, 2008.
(4) D. Lemoine *et al., Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 110*, 20813, 2013.

Pour en savoir plus

P. Minet, « L'optogénétique gagne tous les organes », *La Recherche*, février 2012, p. 62.

UNE PREMIÈRE ÉTAPE DANS LA RESTAURATION DE LA VUE

L'optogénétique est aussi envisagée pour traiter des maladies héréditaires de dégénérescence de la rétine, comme les rétinites pigmentaires, qui se manifestent par une perte de la vision nocturne suivie d'un rétrécissement du champ visuel. L'avancement des recherches ne permet pas encore de faire des tests sur l'homme, mais certaines expériences sur des animaux commencent, semble-t-il, à produire des résultats intéressants. Fin 2014, l'équipe d'Ehud Isacoff, de l'université de Californie à Berkeley, a permis à des souris et à des chiens atteints de ce type de maladie de recouvrer leur capacité à distinguer les stimuli lumineux pendant plusieurs jours – neuf au maximum (1). Les chercheurs ont utilisé un virus pour transporter un gène sur des cellules rétiniennes abîmées de ces animaux. Ils ont modifié ce gène pour provoquer la création de récepteurs lumineux sur les cellules endommagées. Puis ils ont injecté un composé chimique qu'ils ont mis au point, MAG 460, qui a permis de réactiver les récepteurs lumineux des cellules rétiniennes abîmées et de leur rendre la capacité de distinguer entre des flashs lumineux et une lumière continue.

(1) B. M. Gaub *et al., P.N.A.S., 111*, E5574, 2014.

JOURNÉE MONDIALE **ALZHEIMER**
21 SEPTEMBRE 2015

Contre la maladie d'Alzheimer Soyons TOUS mobilisés !

Aujourd'hui, 3 millions* de personnes souffrent de la maladie d'Alzheimer dans notre pays.
POUR NOS AÎNÉS, NOS PARENTS, NOS ENFANTS, IL EST URGENT D'AGIR !

En soutenant France Alzheimer et maladies apparentées, vous agissez sur tous les fronts.

- Faire bénéficier des milliers de familles, partout en France, d'un accompagnement et d'un soutien concret, pour continuer à vivre malgré la maladie ;
- Continuer à faire avancer la recherche par le financement de projets scientifiques parmi les plus prometteurs ;
- Mobiliser les pouvoirs publics et apporter des réponses efficaces face à cet enjeu de santé publique majeur.

Maladie d'Alzheimer. TOUS Concernés. TOUS Mobilisés.

DONNEZ SUR : www.francealzheimer.org ou par chèque à :
France Alzheimer – Opération Journée mondiale – 21 bd Montmartre – 75002 Paris

Merci

DON de CONFIANCE

* *Personnes malades et leurs proches*

www.francealzheimer.org
UN MALADE, C'EST TOUTE UNE FAMILLE QUI A BESOIN D'AIDE

30 ANS DE MOBILISATION

FRANCE ALZHEIMER & MALADIES APPARENTÉES

Service communication France Alzheimer. Maquette : Mélaminebonnemine. SEPT2015.

Santé

Vers un dépistage précoce de la maladie d'Alzheimer

Les précédentes stratégies ayant échoué, les espoirs se portent sur des méthodes permettant de repérer la maladie très tôt, afin de traiter les patients en amont des premiers symptômes.

Par Gautier Cariou, journaliste

Repères

- **Les traitements expérimentaux testés ces dix dernières années contre la maladie d'Alzheimer n'ont pas donné les résultats escomptés.**
- **Les chercheurs pensent qu'une prise de médicaments en début de maladie pourrait être efficace.**
- **Ils mettent donc au point des outils de diagnostic précoce fondés sur l'imagerie cérébrale et l'analyse de marqueurs biologiques et génétiques de la maladie.**

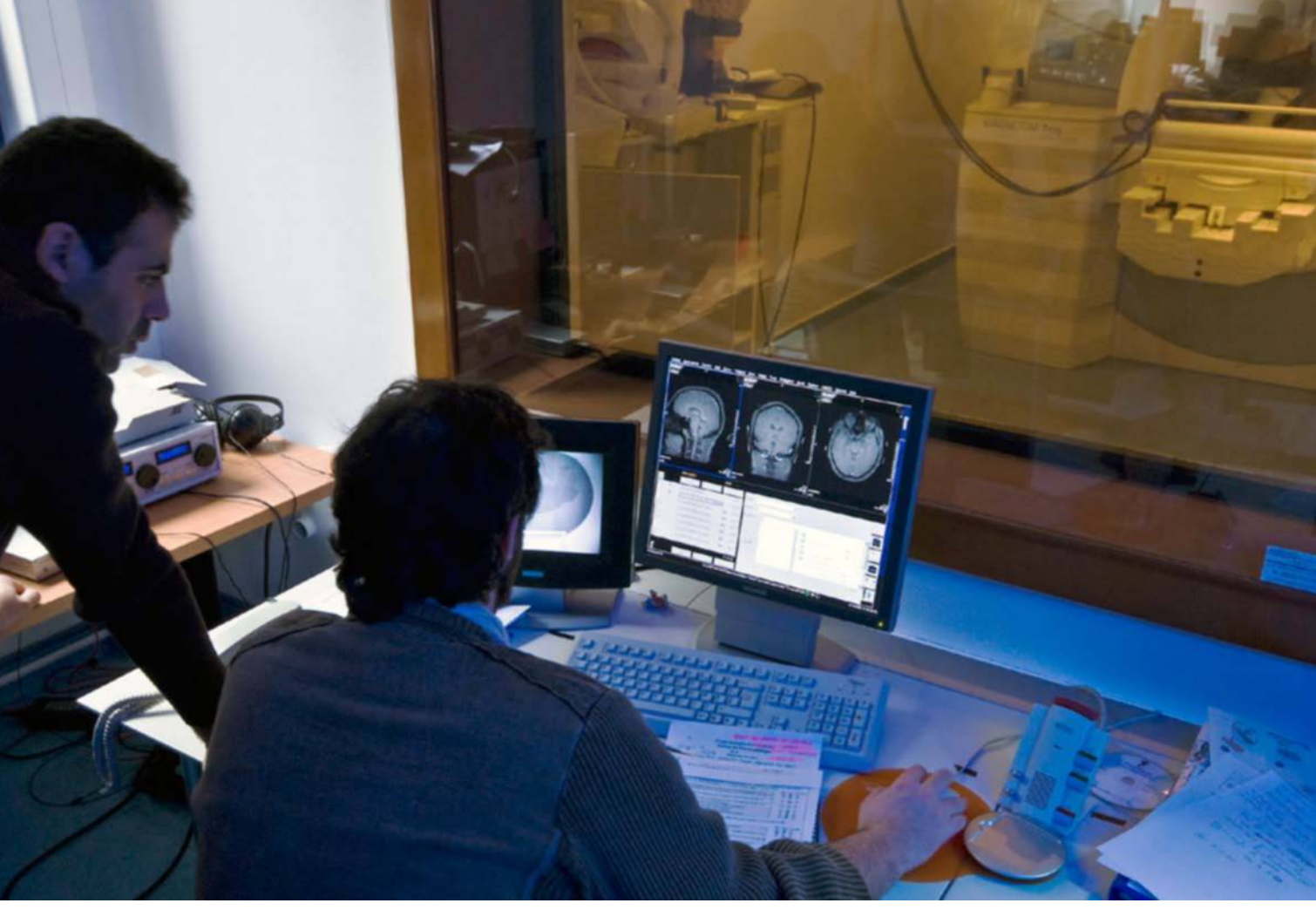
En France, 900 000 personnes sont atteintes de la maladie d'Alzheimer. Elles seront 1,2 million d'ici à 2020. Caractérisée par une lente dégénérescence conduisant à la mort des neurones, cette maladie constitue un problème de santé publique majeur d'autant plus préoccupant qu'il n'existe à ce jour aucun remède. Tous les traitements et vaccins expérimentaux testés jusqu'à présent ont échoué. En 2012, deux essais cliniques de phase III destinés à tester sur des patients l'efficacité de molécules prometteuses – le bapineuzumab et le solanezumab – se sont révélés particulièrement décevants.

À ces tentatives infructueuses, les médecins ont avancé deux raisons : soit les molécules testées sont toutes inefficaces, soit les patients recrutés pour les essais cliniques ont été pris en charge trop tard. Les chercheurs parient sur la seconde option. Ils développent donc des méthodes plus fines pour diagnostiquer la maladie le plus tôt possible et tester des traitements à des stades plus précoces.

Les recherches les plus récentes ont en effet montré que la maladie d'Alzheimer débute de dix à trente ans avant les premiers symptômes. Pendant cette phase silencieuse, elle progresse lentement, et le cerveau utilise ses ressources et sa plasticité pour compenser la mort des neurones. Cela permet aux malades de conserver leurs capacités cognitives malgré la propagation de la maladie. *« Mais, après un temps variable pour chaque individu, cette "réserve cognitive" s'épuise et le cerveau n'est plus en mesure de compenser la mort des neurones,* explique Philippe Amouyel, professeur de santé publique au CHRU de Lille et directeur du laboratoire d'excellence Distalz dédié à la maladie d'Alzheimer. *C'est à ce moment qu'apparaissent les symptômes : pertes de mémoire, troubles du langage, perte des repères spatiaux et temporels, changement de l'humeur voire de la personnalité, avec une perte progressive de l'autonomie. À ce stade, il est probablement trop tard pour espérer une récupération, car les dégâts provoqués par la maladie sont trop avancés. D'où l'idée de traiter les patients en amont des symptômes, quand leur réserve cognitive est encore suffisamment préservée. »*

Pour cibler ces patients, encore faut-il les diagnostiquer suffisamment tôt. Or, exception faite de formes rares (moins de 2 % des cas) et héréditaires de la maladie d'Alzheimer, un diagnostic ne peut être établi avec certitude qu'avec les analyses *post-mortem* du tissu cérébral. Ces analyses ont permis par ailleurs de montrer que 15 % des diagnostics établis du vivant des patients sont erronés. En cause ? Les examens de routine (lire p. 67) pratiqués par les neurologues qui peuvent manquer de précision.

Si l'on souhaite réaliser des essais cliniques, en revanche, la maladie doit non seulement être diagnostiquée le plus tôt possible, mais aussi avec certitude, sous peine d'en fausser les résultats. Tout un pan de la recherche consiste donc à traquer les signes avant-coureurs – ou mar-



▲ *Au centre de neuro-imagerie de recherche, situé à l'hôpital de la Pitié-Salpêtrière, à Paris, le cerveau d'un patient est examiné grâce à l'imagerie par résonance magnétique.*

PATRICE LATRON/LOOK AT SCIENCES

queurs – de la maladie pendant sa phase silencieuse et d'en caractériser la signature aux moyens du profilage génétique, de prélèvements du liquide céphalorachidien (*) par ponction lombaire, de l'imagerie cérébrale, et enfin de tests neuropsychologiques.

PROFILAGE GÉNÉTIQUE

En 1993, Allen Roses, de l'université Duke, aux États-Unis, et Judes Poirier, de l'Institut universitaire en santé mentale Douglas, à Montréal, mettent en évidence un facteur génétique déterminant de la maladie d'Alzheimer : le gène codant l'APO-E, une protéine qui intervient dans le transport du cholestérol et l'entretien des membranes neuronales. Ce gène existe sous trois formes – ou allèles – dans la population : les formes e2 (environ 5 % de la population), e3 (80 %) et e4 (15 %). Or les porteurs de l'allèle e4 voient leur risque de contracter la maladie multipliée par trois ou quatre. Chez les individus homozygotes, c'est-à-dire porteurs de deux allèles e4, ce risque est multiplié par quinze (1). Aujourd'hui, environ trente gènes et régions chromosomiques impliqués dans la forme courante de la maladie d'Alzheimer ont été identifiés en plus du gène de l'APO-E (2). Deux études cliniques en cours visant à étudier l'évolution naturelle de la maladie, l'Alzheimer Disease Neuroimaging Initiative (Adni), aux États-Unis, et l'étude Memento, en France, utilisent ainsi le profilage génétique pour évaluer la pertinence de ces facteurs génétiques dans le diagnostic précoce. Toutefois, ces informations génétiques ne suffisent pas à elles seules pour établir un diagnostic. Aussi les chercheurs s'intéressent-ils à d'autres signes précurseurs de la maladie, en particulier les lésions cérébrales.

De nombreux marqueurs utilisés aujourd'hui visent en effet à quantifier l'étendue des lésions cérébrales impliquées dans la maladie d'Alzheimer. Ces lésions, les « plaques amyloïdes » et les « dégénérescences neurofibrillaires », sont respectivement caractérisées par une accumulation anormale de dépôts biologiques entre les neurones et une altération des fibres présentes à l'intérieur des neurones. Les plaques amyloïdes se forment suite à l'agrégation de molécules appelées « peptides bêta-amyloïdes ». La dégéné- •••

(*) **Le liquide céphalorachidien** est le liquide biologique transparent dans lequel baignent le cerveau et la moelle épinière.

●●● rescence neurofibrillaire s'explique quant à elle par la modification d'une protéine intracellulaire, la protéine Tau, dont le rôle est de maintenir ensemble les multiples fibres qui composent le squelette du neurone et lui confère sa forme étoilée. Suite à une réaction dite de « phosphorylation » anormalement importante, cette protéine perd en partie ses propriétés, entraînant une déstabilisation de la structure du neurone et sa mort. L'une des approches pour un diagnostic précoce consiste donc à mesurer la quantité de protéines Tau et de bêta-amyloïdes dans le liquide céphalorachidien où baignent le cerveau et la moelle épinière. De fait, plus les plaques amyloïdes s'accumulent et se fixent dans le cerveau, plus leur concentration a tendance à diminuer dans le liquide céphalorachidien. À l'inverse, plus la dégénérescence neurofibrillaire est importante, plus les neurones libèrent leur contenu dans le milieu extracellulaire et plus la quantité de protéines Tau est élevée dans le liquide céphalorachidien.

En 2006, des chercheurs de l'université de Lund, en Suède, démontrent ainsi que la mesure combinée des taux de bêta-amyloïdes, de protéines Tau, et de protéines Tau phosphorylées chez des patients atteints de troubles cognitifs légers permet de prédire leur évolution vers une maladie d'Alzheimer. Si au moins deux de ces marqueurs sont présents en quantité anormale chez un patient, alors sa probabilité de déclarer une maladie d'Alzheimer dans les cinq ans qui suivent le test avoisinera les 90 % (3). *« En ce moment, nous testons d'autres marqueurs biologiques moins classiques, ceux du système immunitaire, parmi lesquels les interférons, les interleukines, les chemokines… Le système immunitaire a cela d'intéressant qu'il est le premier à réagir en émettant des signaux d'urgence lorsque les neurones sont en détresse. En les mesurant, on peut donc espérer détecter la maladie de façon très précoce »*, explique Judes Poirier.

Lors du congrès mondial annuel de l'association d'Alzheimer (AAIC) qui s'est tenu à Washington en juillet dernier, son équipe a ainsi présenté des résultats préliminaires d'une étude clinique qu'elle mène depuis deux ans destinée à caractériser la valeur prédictive de différents marqueurs. *« Il semble que les marqueurs immunitaires augmentent avant la protéine Tau et la bêta amyloïde (4). Toutefois, il faudra encore deux ans pour en tirer des conclusions définitives. »*

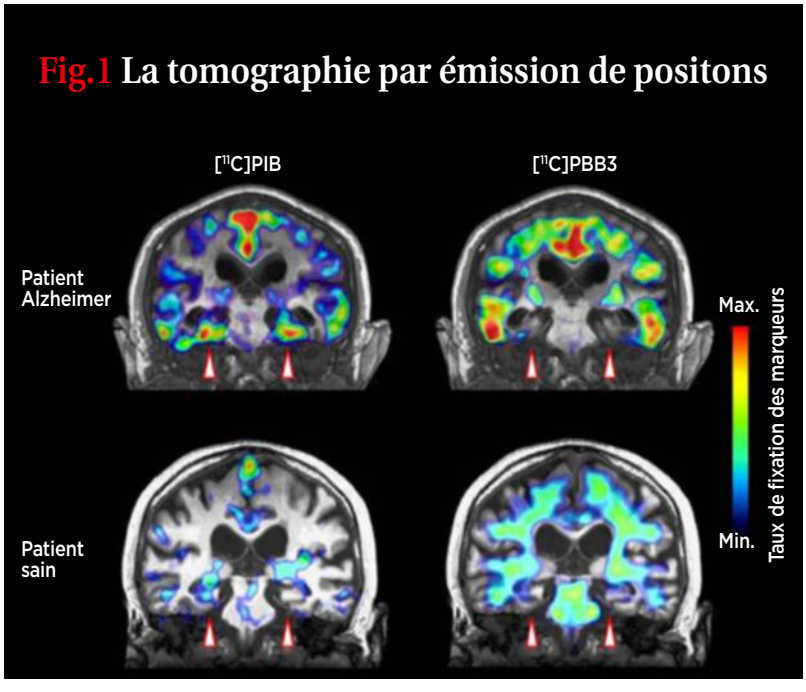
MESURE DES LÉSIONS CÉRÉBRALES

Une autre méthode permet de mesurer l'ampleur des lésions cérébrales : la tomographie par émission de positons (Fig. 1). Le principe : des radiotraceurs sont injectés dans la circulation sanguine du patient et se lient spécifiquement et de façon temporaire aux plaques amyloïdes ou aux dégénérescences neurofibrillaires. Mais encore faut-il que ces éléments radioactifs soient capables de se lier au peptide bêta-amyloïde et à la protéine Tau et à rien d'autre. Trois d'entre eux permettent de se lier au peptide bêta-amyloïdes. Les plaques amyloïdes deviennent alors visibles.

En 2014, trois nouveaux marqueurs radioactifs spécifiques de la protéine Tau ont quant à eux permis de mesurer pour la première fois l'étendue des dégénérescences neurofibrillaires chez l'homme. Pour l'heure, le coût de ces examens est prohibitif pour une utilisation à grande échelle et leur validité comme outil de diagnostic reste à prouver. C'est aujourd'hui l'objet de nombreuses recherches, en particulier dans le cadre des études Adni et Memento qui se termineront respectivement en 2017 et en 2019.

Depuis quelque temps, un nouvel outil de diagnostic émerge : l'IRM fonctionnel (IRMf), qui permet de mesurer l'activité des réseaux de neu-

▼ **Les marqueurs radioactifs [^{11}C]PIB et [^{11}C]PBB3 se lient respectivement à la bêta-amyloïde et à la protéine Tau, responsables des lésions cérébrales associées à la maladie d'Alzheimer. La tomographie par émission de positons révèle une fixation abondante de ces marqueurs chez le malade (zones en rouge).**



NATIONAL INSTITUTE OF RADIOLOGICAL SCIENCES, JAPON

rones pendant un temps donné. En juillet, deux chercheurs de l'École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), en Suisse, ont développé une nouvelle méthode de traitement des données d'IRMf qui permet de visualiser l'activité instantanée des réseaux de neurones (5). *« En mesurant cette activité chez des volontaires sains au repos, on s'est aperçus que quatre réseaux en moyenne s'activent simultanément, alors qu'on pensait que ces réseaux s'activaient en alternance »*, explique Dimitri Van De Ville, l'un des auteurs de la publication. En étudiant à chaque instant les relations dynamiques qu'entretiennent ces réseaux au repos, les chercheurs espèrent donc pouvoir repérer la maladie de façon très précoce, non plus à partir des lésions mais à partir des dysfonctionnements cérébraux qu'elles provoquent.

Selon Dimitri Van De Ville, l'interprétation de ces IRMf pourrait, à terme, se faire de façon automatisée grâce à des algorithmes entraînés à reconnaître les signes avant-coureurs de la maladie d'Alzheimer sur de grandes bases de données standardisées. Et c'est là tout l'enjeu du Centre d'acquisition et de traitement des images, une plate-forme nationale créée dans le cadre du Plan Alzheimer 2008-2012. *« Destinée à recueillir, à traiter mathématiquement puis à harmoniser toutes les données brutes envoyées par les différents centres d'imagerie universitaires, cette plate-forme pourrait bénéficier de la méthode informatique mise au point par l'EPFL,* précise Philippe Amouyel. *Dans ce cadre, ce genre d'outil pourrait s'avérer remarquable, à condition bien sûr de valider sa pertinence pour le diagnostic par des études cliniques ».*

EXAMENS NEUROPSYCHOLOGIQUES

Si l'imagerie cérébrale est promise à un bel avenir, il ne faut pas pour autant sous-estimer la valeur prédictive des examens neuropsychologiques. En 2008, une étude française de plus de vingt ans, l'étude Paquid, initiée en 1988 et réunissant 3 777 volontaires, a mis en évidence qu'un déclin cognitif apparaît bien avant que la maladie d'Alzheimer ne se déclare. En examinant les tests neuropsychologiques prodigués lors de cette étude, les neurologues ont en effet remarqué des différences très fines entre les individus sains et les individus malades. En particulier, la capacité à énoncer rapidement la catégorie à laquelle se rattache un mot est abaissée de façon significative chez les personnes malades. Et cela douze ans avant l'apparition des premiers symptômes d'Alzheime (6) !

Toutefois, selon Judes Poirier et Philippe Amouyel, aucun marqueur pris individuellement ne permettra de prédire avec certitude la survenue de la maladie d'Alzheimer. À terme, le diagnostic précoce reposera sur un faisceau de marqueurs qui, pris collectivement, prendront tout leur sens. *« Dans quelques années, lorsque les essais en cours sur les patients seront terminés, nous aurons une vision plus claire de la spécificité prédictive de chacun de ces marqueurs,* prévoit Judes Poirier. *On peut même imaginer des algorithmes capables de prendre en compte à la fois les données issues de l'imagerie cérébrale, des marqueurs biochimiques et génétiques à partir desquelles les médecins établiront un diagnostic précoce avec certitude. »*

Philippe Amouyel rappelle cependant qu'un dépistage précoce à grande échelle ne sera pas envisageable tant qu'aucun traitement n'aura démontré son efficacité ou que des mesures de prévention pourront être mises en œuvre. Le fait qu'un patient sache qu'il va contracter à coup sûr la maladie sans espoir de guérison pose en effet de sérieux problèmes éthiques. Le diagnostic précoce chez des sujets dépourvus de symptômes doit donc intervenir uniquement dans une perspective de recherche bien encadrée. ■

15 % DES DIAGNOSTICS ERRONÉS

Actuellement, les patients âgés qui se plaignent de troubles de la mémoire sont dirigés par leur médecin traitant vers l'un des 28 centres mémoires répartis sur toute la France. Un neurologue leur fait alors passer des tests neuropsychologiques destinés à évaluer leur mémoire et leurs capacités cognitives. Ensuite, une analyse du volume de leur cerveau est réalisée grâce à l'imagerie par résonance magnétique (IRM). La maladie d'Alzheimer est en effet associée à une atrophie cérébrale visible à l'IRM. Toutefois, cette atrophie n'est pas spécifique de la maladie d'Alzheimer, de même que les tests neuropsychologiques n'apportent que des indices et non pas la preuve qu'un patient est bien atteint de cette pathologie. D'où des erreurs inévitables dans 15 % des diagnostics de routine.

(1) J. Poirier *et al., The Lancet, 342,* 697, 1993.
(2) J.-C. Lambert *et al., Nature Genetics, 45,* 1452, 2013.
(3) O. Hansson *et al., The Lancet Neurology, 5,* 228, 2006.
(4) P. Orban *et al.,* Congrès de AAIC, Washington, 2015.
(5) Fikret Isik Karahanoglu et Dimitri Van De Ville, *Nature communications, 6,* 7751, 2015.
(6) H. Amieva *et al., Ann. Neurol., 64,* 492, 2008.

Pour en savoir plus

■ Alzheimer Infos : éditée par la Fondation Plan Alzheimer, cette application fournit des informations générales et scientifiques référencées et mises à jour régulièrement à destination des patients, des familles, des professionnels de santé et des chercheurs.

■ **http://fondation-alzheimer.org** Destiné à tous les publics, ce site contient des informations sur les recherches menées en France contre la maladie d'Alzheimer.

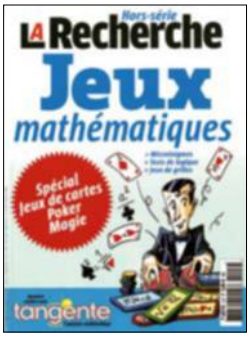
■ **www.francealzheimer.org** Le site internet de l'association France Alzheimer détaille les projets de recherche en cours pour lutter contre la maladie.

Découvrez notre choix de livres à offrir ou à vous offrir.

Jeux mathématiques et énigmes policière

Qu'apportent les mathématiques à la progression rigoureuse des enquêtes policières ? Des articles scientifiques tentent d'y répondre. Ils alternent avec des énigmes policières que vous serez amenés à résoudre avec pour seule arme votre ingéniosité.

Réf. LR09 **5,50€**



Jeux mathématiques Spécial jeux de cartes, poker, magie

Mathématiques et jeux de cartes, c'est un mariage naturel. Les mathématiques ont aussi un rôle fondamental dans nombre de tours de magie utilisant des cartes. En suivant les conseils donnés dans ces pages, vous en comprendrez les ressorts et éblouirez vos amis.

Réf. LR10 **5,50€**

Jeux mathématiques Spécial élections

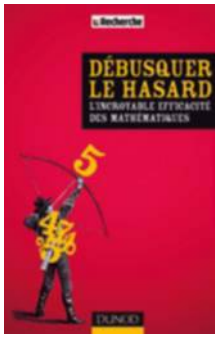
Les sondages, les stratégies de votes, le découpage électoral n'auront bientôt plus de secrets pour vous. Plaisir de jouer, plaisir de comprendre, vivez un agréable divertissement avec les mathématiques électorales.

Réf. LR11 **5,50€**

Jeux - Testez votre intelligence

Dans ce numéro exceptionnel, les plus grands spécialistes des neurosciences font le point sur les dernières avancées, quitte à bousculer bien des idées reçues. Quant aux meilleurs créateurs de jeux, ils mettent en application sur près de 40 pages, toutes les facettes du jeu d'intelligence.

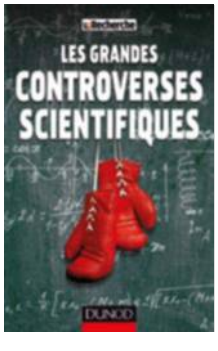
Réf. LR12 **5,50€**



Débusquer le hasard

Compilation d'articles parus dans La Recherche, cet ouvrage décrit 32 situations où mathématiques rime avec efficacité.

Réf. LR05 **16,00€**
- 5% soit **15,20€**



Les grandes controverses scientifiques

Ce livre raconte douze controverses qui ont accompagné les grandes découvertes scientifiques.

Réf. LR06 **14,50€**
- 5% soit **13,78€**

Dossiers Santé

100 idées reçues sur la santé dont il faut se méfier

Dans ce numéro spécial : des informations et conseils sur ce qui vous intéresse au plus haut point, votre santé.

Réf. LR07 **5,90€**

Le cœur

La Recherche et ses partenaires de la presse quotidienne régionale et de Belgique vous présentent ce « Dossier Santé » où l'information claire et accessible est validée par des spécialistes.

Réf. LR08 **4,90€**

@chetez 7 jours/7 sur sophiaboutique.fr

Votre commande atteint 49€ FRAIS DE PORT OFFERTS

Entrez la référence du produit (inscrite à côté de chaque article) dans le moteur de recherche et achetez en quelques clics.

Livraison à domicile rapide
NOUVEAU ! livraison en Point Relais

Paiement sécurisé

Satisfait ou remboursé

100% des articles en stock

La Recherche — Complétez votre collection

LE MENSUEL
6,40€ le numéro

Année 2014

- N°483 janvier 2014
  SPÉCIAL : Le top des 10 découvertes de l'année
- N°484 février 2014
  Entretien : Peter Higgs
- N°485 mars 2014
  Dossier : ordinateur quantique.
- N°486 avril 2014
  Dossier : Le génie d'Alexandre Grothendieck.
- N°487 mai 2014
  Dossier : T-Rex. Enquête sur la star des dinosaures.
- N°488 juin 2014
  Dossier : Bitcoin, la monnaie devient numérique.
- N°489 juillet-août 2014
  SPECIAL : La réalité n'existe pas.
- N°490 août 2014
  Les 40 livres de science indispensables.
- N°491 septembre 2014
  Dossier : Qui sont vraiment nos ancêtres ?
- N°492 octobre 2014
  Dossier : Incertitude quantique.
- N°493 novembre 2014
  Dossier : Comment savons-nous que nous sommes morts ?
- N°494 décembre 2014
  Dossier : Maths, les femmes prennent-elles le pouvoir ?

Année 2015

- N°495 janvier 2015
  Dossier : Les 10 découvertes les plus importantes de l'année.
- N°496 février 2015
  Dossier : L'origine de l'univers dévoilée.
- N°497 mars 2015
  Dossier : Stress, comment il modifie notre cerveau.
- N°498 avril 2015
  Dossier : Intelligence artificielle, jusqu'où iront les réseaux sociaux.
- N°499 mai 2015
  Dossier : Kilo, Ampère, Kelvin, Mole Pourquoi les physiciens redéfinissent les unités de mesure.
- N°500 juin 2015
  Dossier : Neurosciences. Comment l'empathie naît chez l'Homme.
- N°501-502 juillet-août 2015
  NUMÉRO DOUBLE
  Dossier : Les révolutions quantiques.

LES DOSSIERS DE LA RECHERCHE
6,90€ le numéro

Année 2013

SP02 : Les origines de la vie
SP03 : Les abysses
SP04 : Les particules élémentaires
SP05 : Jeux de mathématiques et de physique
SP06 : Addictions
SP07 : L'album de l'année 2013

Année 2014

NOUVELLE FORMULE

SP08 : L'intelligence artificielle
SP09 : Les nouvelles dimensions du son
SP10 : Piloter la machine par la pensée
SP11 : Internet, pour le meilleur et pour le pire
SP12 : La télévision du futur
SP13 : Comment les robots perçoivent le monde

Année 2015

SP14 : La lumière

Et pour conserver votre collection précieusement

➲ **l'écrin 12 numéros 18€ seulement**

(hors frais de port)

Retrouvez l'intégralité des numéros disponibles sur le site www.sophiaboutique.fr

Bon de commande

À retourner sous enveloppe affranchie à LA RECHERCHE
BP 65 - 24 chemin Latéral - 45390 Puiseaux - ✆ 33 (0) 2 38 33 42 89 - nchevallier.s@orange.fr

V504

Nom : Prénom :

Adresse :

Code postal : Ville : Pays :

Tél. E-mail : @

Pour recevoir plus rapidement des informations sur votre commande, merci de nous indiquer votre e-mail.

Oui, je souhaite recevoir dans les 10 jours la commande ci-dessous

Indiquez ci-dessous les numéros souhaités	Quantité	Prix unitaire	TOTAL
■ LA RECHERCHE		6,40 €	€
■ LES DOSSIERS DE LA RECHERCHE		6,90€	€
■ L'écrin LA RECHERCHE 12 numéros		18,00 €	€
FRAIS DE PORT : France métropolitaine (Étranger, nous contacter) **1,50€** le numéro / + **0,50€** le numéro supplémentaire **6,85€** l'écrin / **8,35€** de 2 à 3 / **9,10€** de 4 à 5 Au-delà de 5 écrins, nous contacter.			€
Total de ma commande (Frais de port inclus)			€

Je règle aujourd'hui par :

❒ chèque à l'ordre de *SOPHIA PUBLICATIONS* ❒ carte bancaire

N°

Je note aussi les 3 derniers chiffres du numéro inscrit au dos de ma carte bancaire, au niveau de la signature : Expire fin :

Signature obligatoire :

Votre commande sera expédiée à réception de votre règlement.

Loi informatique et libertés : vous disposez d'un droit d'accès et de rectification des données vous concernant. Elles pourront être cédées à des organismes extérieurs sauf si vous cochez la case ci-contre ☐

Technologie

Vote électronique : un scrutin à sécuriser

Les systèmes actuels de vote par Internet manquent souvent de transparence. Les algorithmes doivent être améliorés pour s'approcher de la fiabilité des scrutins traditionnels.

Par Véronique Cortier, chercheuse en informatique

Repères

- **Le vote par Internet est un mode de scrutin officiel pour les expatriés.**
- **Les algorithmes fondés sur des preuves mathématiques permettent d'en vérifier le bon déroulement et la confidentialité.**
- **Ces outils numériques sont intégrés dans un logiciel libre de vote en ligne baptisé Helios.**

Bulletin, isoloir, urne… Pour les Français de l'étranger, le triptyque du vote traditionnel a été remplacé par un ordinateur personnel. En 2012, les citoyens français expatriés ont ainsi pu élire leurs députés par Internet sans avoir à se déplacer jusqu'à leur ambassade. De la même façon, l'UMP *[désormais Les Républicains, NDLR]* a choisi ce système pour élire son président en 2014.

Pour autant, le vote en ligne – ou vote électronique – est loin d'être aussi fiable que le vote classique. Les menaces sont nombreuses : si l'ordinateur de l'électeur est infecté par un virus, le contenu de son bulletin peut être révélé à un site web distant, voire modifié. Par ailleurs, lors d'un scrutin électronique, tous les votes sont conservés dans une « urne numérique », un fichier informatique stocké sur un serveur. Un hacker habile pourrait pénétrer sur le serveur, modifier le contenu de l'urne numérique, donc le résultat du scrutin.

C'est ainsi qu'en 2010, Alex Halderman, chercheur en informatique à l'université du Michigan, aux États-Unis, s'est illustré en prenant le contrôle du système de vote mis en place par le district de Columbia (Washington D.C.) pour les citoyens américains de l'étranger. En un tournemain, il est parvenu à injecter un code informatique malveillant pour contrôler le serveur, à modifier les bulletins et à diffuser l'hymne de son université sur la page web qui s'affichait à la fin de chaque vote (1). Deux jours ont été nécessaires aux autorités gouvernementales pour détecter la fraude. Fort heureusement, ce scrutin n'était qu'un test grandeur nature ouvert aux informaticiens de tous bords et destiné à évaluer la sécurité du système de vote avant son déploiement réel.

Ce coup d'éclat illustre la difficulté d'empêcher une personne malveillante et motivée de s'introduire sur un serveur. Les protocoles (*) de vote que nous et d'autres laboratoires de recherche développons actuellement n'ont d'ailleurs pas vocation à éviter ce genre d'attaque mais plutôt à en réduire la portée. Nous partons donc du principe que le serveur est corrompu puis démontrons que, malgré la faille, rien de mal ne peut être fait. Pour cela, nous avons mis au point des algorithmes qui, non seulement améliorent les méthodes de cryptage des votes, mais permettent aussi d'apporter une preuve formelle de l'absence de fraude lors d'une élection.

Pour être fiables, les protocoles doivent intégrer deux propriétés inhérentes à un bon système de vote : la confidentialité et la vérifiabilité. La première implique que nul ne doit savoir comment un électeur a voté. Lors d'un vote classique, l'électeur glisse le bulletin de son choix dans une enveloppe à l'abri des regards grâce à un isoloir. Tous les bulletins présents dans l'urne sont mélangés avant le dépouillement, ce qui assure qu'aucun lien ne peut être établi entre l'électeur et son vote. Les recommandations de la Commission nationale de l'informatique et des

(*) **Un protocole** est un ensemble de procédures à respecter pour échanger des informations en ligne.

libertés en matière de vote électronique reprennent très exactement ce point : *« Le dispositif doit garantir que l'identité de l'électeur ne peut pas être mise en relation avec l'expression de son vote et cela à tout moment du processus de vote, y compris après le dépouillement. »*

La seconde propriété, appelée vérifiabilité, est tout aussi importante puisqu'elle assure la transparence et donc l'intégrité du scrutin. Dans le cas d'un vote traditionnel, elle se traduit par la possibilité pour tout électeur de vérifier que son bulletin est bien présent dans l'urne, quitte à la surveiller toute la journée pour s'en assurer. De la même façon, lors du dépouillement public, chacun peut s'assurer que le décompte des voix correspond au nombre de bulletins déposés par les électeurs. Enfin, il faut pouvoir vérifier que les bulletins proviennent bien tous d'électeurs légitimes, authentifiés grâce à leur pièce d'identité. Seulement, dans le cas du vote électronique, la confidentialité et la vérifiabilité s'opposent. En effet, comment prouver que le bulletin de chaque électeur a été pris en compte dans le calcul du résultat, sans en dévoiler le contenu ? Aussi, la plupart des systèmes de vote commercialisés actuellement – soumis par ailleurs au secret du brevet – se concentrent-ils sur le critère de confidentialité au détriment de la transparence, qui reste le parent pauvre du vote en ligne. Sans urne visible, pas de dépouillement public et donc aucune transparence possible ! Or la notion de transparence est au cœur d'une élection démocratique.

URNE NUMÉRIQUE PUBLIQUE

La conception d'un bon système de vote sur Internet demande un équilibre délicat entre la confidentialité et la transparence. De nombreux chercheurs se prêtent à cet exercice en améliorant par exemple le code d'un système de vote baptisé Helios, un logiciel sous licence libre mis au point en 2008 par Ben Adida, Olivier de Marneffe et Olivier Pereira, chercheurs en informatique à l'université Harvard, aux États-Unis, et à l'université catholique de Louvain, en Belgique. En plus d'être un outil de recherche, Helios a également fait ses preuves lors d'élections réelles. En 2009, il a été utilisé pour élire le président de l'université de Louvain. Les membres de l'Association internationale pour la recherche en cryptologie l'ont également choisi depuis 2010 pour élire leur équipe dirigeante. Le point fort d'Helios : il possède une urne numérique publique, c'est-à-dire une page web que chacun peut consulter pour s'assurer que son vote a bien été pris en compte. Par conséquent, le critère de vérifiabilité est respecté.

En pratique, le vote électronique avec Helios se déroule en deux étapes : le vote et le dépouillement. Dans le cas d'un référendum, l'électeur sélectionne son choix – 0 ou 1 – respectivement associé au vote « non » ou « oui ». Son ordi- •••

Illustrations : Delius

••• nateur crypte ensuite le vote avec une clé de chiffrement publique – une série de chiffres propre à l'élection – formant ainsi le bulletin crypté. Une fois l'électeur authentifié à l'aide d'un identifiant et d'un mot de passe, il envoie son bulletin au serveur de l'élection. Le serveur l'affiche alors avec les autres bulletins déjà déposés. Ainsi, l'électeur peut s'assurer que son bulletin est bien dans l'urne.

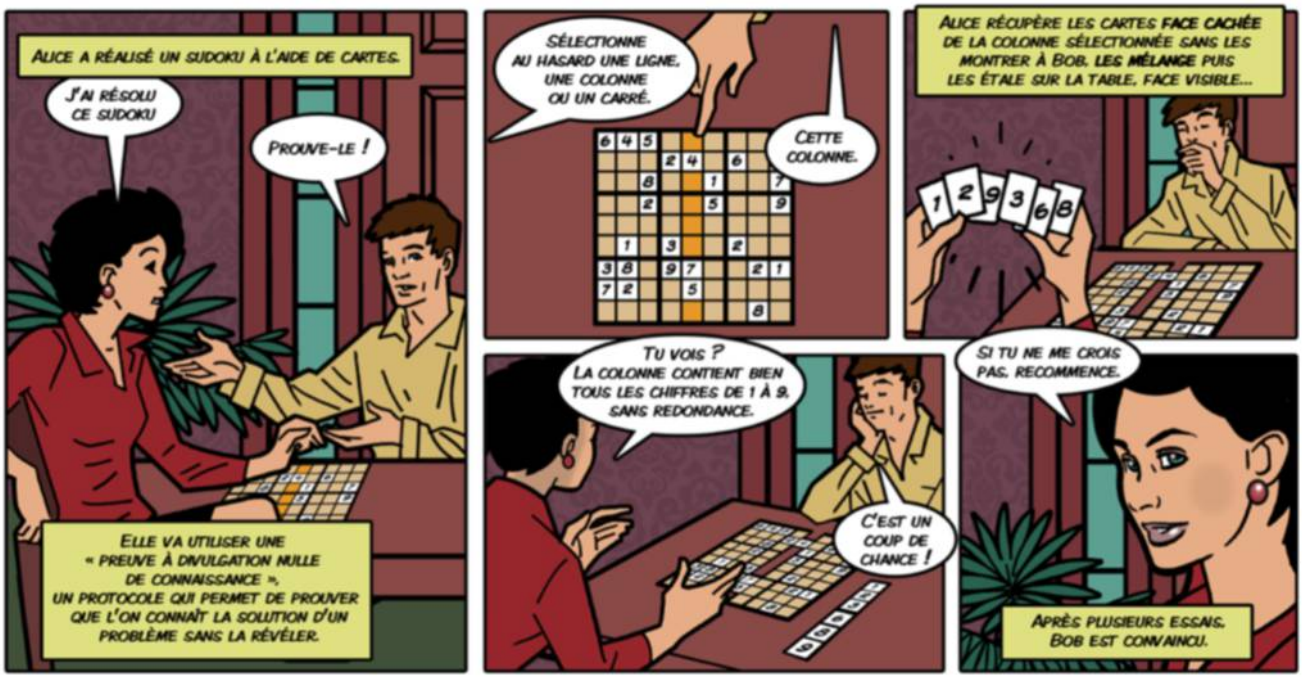
La phase de dépouillement nécessite l'utilisation d'une clé de déchiffrement privée qui, avant le vote, est partagée entre trois ou quatre autorités de déchiffrement (maire, responsables de différents partis, etc.). Chacune des autorités possède un « morceau » de la clé, de sorte qu'une mise en commun d'au moins deux morceaux est nécessaire pour procéder au déchiffrement du résultat de l'élection.

MULTIPLIER POUR ADDITIONNER

Toujours dans une optique de confidentialité, les bulletins cryptés ne sont pas déchiffrés individuellement mais tous ensemble. De fait, le chiffrement utilisé pour le vote sur Internet est du type El Gamal, qui a une propriété mathématique particulière, dite « homomorphe » : on peut, directement et sans utiliser aucune clé, combiner les bulletins cryptés pour obtenir le chiffrement du résultat à proclamer. En pratique, il suffit de multiplier les bulletins chiffrés pour obtenir la somme chiffrée des bulletins. Autrement dit, l'égalité suivante est satisfaite : $\{\text{bulletin 1}\}_{\text{chiffré}} \times \{\text{bulletin 2}\}_{\text{chiffré}} \times \ldots \times \{\text{bulletin N}\}_{\text{chiffré}} = \{\text{bulletin 1} + \text{bulletin 2} + \ldots + \text{bulletin N}\}_{\text{chiffré}}$.

Reste à apporter la preuve que le résultat annoncé correspond bien à la somme des votes contenus dans la multiplication des bulletins cryptés. Pour cela, on utilise une fonction cryptographique appelée la preuve à divulgation nulle de connaissance (3). Elle permet de prouver qu'une propriété est vraie sans rien révéler du contenu de celle-ci. Par exemple, on pourrait prouver qu'on a résolu un sudoku sans en dévoiler la solution (lire ci-dessous). Dans le cas du vote, chaque autorité apporte une preuve mathématique que le résultat annoncé correspond bien au déchiffrement de la multiplication des bulletins cryptés. Grâce à ces preuves, chaque électeur peut se convaincre que son vote est bien pris en compte, sans même avoir à faire confiance au serveur de l'élection. En outre, le

PROTOCOLE DE VÉRIFICATION DU VOTE APPLIQUÉ AU SODOKU



vote est chiffré dès son envoi et seul le résultat final de l'élection est déchiffré. Par conséquent, nul ne peut connaître le vote d'un électeur donné, pas même le serveur de l'élection, ni les autorités de déchiffrement – à moins que plusieurs d'entre elles ne soient corrompues.

Le système tel qu'il est présenté ici comprend en fait une faille : la clé de chiffrement est publique, aussi les bulletins pourraient-ils être déchiffrés par comparaison. En effet, n'importe qui pourrait chiffrer le bulletin 0 et le bulletin 1. Il suffirait ensuite à cette personne d'intercepter le vote d'un électeur puis d'en déduire le contenu en le

Le système Helios ne permet pas d'empêcher l'achat de vote, propriété indispensable lors de scrutins à forts enjeux

comparant aux bulletins cryptés qu'il a lui-même générés. Fort heureusement, dans le vrai protocole, cela n'est pas possible car le chiffrement est « randomisé » : l'ordinateur de l'électeur engendre un nombre aléatoire qu'il intègre au bulletin chiffré, de sorte que s'il chiffre 0 à deux moments différents, deux chiffrements distincts sont fabriqués. De quoi assurer l'inviolabilité du cryptage.

Que se passerait-il maintenant si un électeur malhonnête votait 100 au lieu de 1 ? Puisque les bulletins ne sont jamais déchiffrés individuellement, cette attaque ne serait jamais détectée et l'électeur aurait ainsi ajouté 100 voix pour le « oui » ! Ici, ce sont à nouveau les preuves à divulgation nulle de connaissance qui sont utilisées. Chaque bulletin chiffré est donc accompagné d'une preuve mathématique qu'il vaut soit 0, soit 1, sans donner aucune information permettant de déduire si l'électeur a voté 0 ou 1.

Grâce à cette preuve mathématique, les dégâts d'un hacker qui prendrait possession du serveur de vote seraient limités : il ne pourrait ni supprimer, ni modifier les bulletins présents dans l'urne car les électeurs – ou n'importe quel observateur extérieur – pourraient s'apercevoir de la fraude. En revanche, il pourrait ajouter des bulletins en comptant sur le fait qu'un certain nombre d'électeurs vont s'abstenir. Avec mon équipe, nous •••

COLAS

en association avec La Recherche

Les Rencontres Scientifiques Colas

Conférence-débat
le jeudi 22 octobre 2015
de 18h00 à 19h30

*animée par **Gautier Cariou***
journaliste à La Recherche

"ROBOTS : vers une collaboration homme-machine"

avec

Yann Perrot
Chef du laboratoire de robotique interactive au CEA List

et

Serge Grygorowicz
Président-directeur général et fondateur de RB3D

Exosquelettes, bras chirurgicaux, robots porteurs de charges… Et si la machine ne remplaçait pas l'homme, mais le secondait dans ses tâches les plus pénibles ? C'est là tout l'enjeu de la « cobotique » ou robotique collaborative : faire sortir les robots hors de leurs cages, les faire travailler main dans la main avec les hommes, les faire évoluer dans le même espace de travail. Loin du stéréotype des machines qui font disparaître des emplois, ces « cobots » ont au contraire vocation à améliorer les conditions de travail, réduire la fatigue et les risques d'accidents.

Inscription obligatoire avant le 15 octobre 2015 :
rencontres-scientifiques@colas.fr

Lieu : Campus Scientifique et Technique Colas
4, rue Jean Mermoz
78114 Magny-les-Hameaux

Une navette sera à votre disposition à 16h45
au départ du Siège de Colas
7, place René Clair - 92100 Boulogne-Billancourt
M° Porte de St-Cloud
(Navette stationnée avenue Félix d'Hérelle)

Dans le canton de Zurich, en Suisse, en 2009, un électeur s'apprête à voter sur Internet après avoir reçu son identifiant par courrier.

●●● avons donc développé une variante d'Helios, appelée Belenios, qui empêche le bourrage des urnes de la manière suivante : l'électeur reçoit, en plus de son identifiant et de son mot de passe, un jeton de vote à usage unique lui permettant de signer son bulletin (4). Les clés de vérification étant publiques, chacun peut vérifier que les bulletins sont correctement signés. De cette façon, même un attaquant présent sur le serveur de l'urne ne peut ajouter de bulletin car il n'a pas de clé de signature valide.

Si le système de vote Helios concilie confidentialité et transparence, il n'assure en revanche pas ce que l'on appelle la résistance à la coercition, indispensable lors de scrutins à forts enjeux. Dans le cas d'un vote traditionnel à l'urne, un électeur peut dire pour qui il a voté, mais pas le prouver. Il se peut donc qu'il mente. Cette propriété est cruciale pour empêcher l'achat de vote (ou la coercition). De fait, à partir du moment où un électeur peut prouver à un tiers pour qui il a voté, alors ce tiers peut le pousser – en échange d'argent ou par la force – à voter d'une certaine façon. Quitte à menacer l'électeur après le vote et à lui extorquer la preuve qu'il a bien suivi les consignes de vote. Or dans le cas du système Helios, si un électeur montre tous les éléments qui ont permis de construire son bulletin, en particulier les nombres aléatoires utilisés lors du cryptage, alors il peut convaincre une tierce personne que son bulletin est bien le sien et qu'il correspond à un vote donné. Par conséquent, Helios ne doit pas être utilisé dans un contexte où l'achat de vote est possible.

ATTAQUES VIRALES

Au-delà de ce type d'attaques, un grand point faible de la majorité des systèmes actuels est l'ordinateur du votant : si l'ordinateur est infecté, il peut faire envoyer le vote en clair à une tierce personne et briser ainsi l'anonymat du votant. Par ailleurs, il pourrait modifier le vote avant de le chiffrer : si l'électeur choisit le candidat A, l'ordinateur peut subrepticement chiffrer B. Pour contrer ce type d'attaques, de nombreuses solutions sont à l'étude. Elles reposent souvent sur l'utilisation d'un second appareil : un téléphone ou un dispositif de sécurité dédié comme ceux utilisés désormais par les banques. Il s'agit alors de contrôler le fonctionnement de son ordinateur à l'aide de ce second appareil qui permet, par exemple, de vérifier le vote reçu par l'urne.

Bien que le vote à l'urne reste le plus sécurisé, le vote par Internet peut remplacer avantageusement certains systèmes comme le vote par correspondance. À condition d'améliorer encore les systèmes actuels pour permettre aux électeurs de s'assurer eux-mêmes de la sincérité du scrutin. ■

(1) S.Wolchok *et al., Proc. 16th Conf. on Financial Cryptography & Data Security,* 2012.
(2) B. Adida, *17th USENIX Security Symposium,* 2008.
(3) O. Goldreich *et al., Journal of the ACM, 38,* 690, 1991.
(4) V. Cortier *et al.*, ESORIC'14, 2014.

Pour en savoir plus

■ **https://vote.heliosvoting.org**
Ce site héberge le code du logiciel de vote Helios.

■ **http://tinyurl.com/vote-internet**
Mise en ligne lors des élections consulaires de 2014, cette vidéo explique le déroulement du vote par Internet.

UNE AUTHENTIFICATION À HAUT RISQUE

Un point épineux des systèmes de vote par Internet est l'authentification de l'électeur. En règle générale, un électeur s'authentifie à l'aide d'identifiants reçus par courrier. Une personne qui l'intercepterait pourrait donc voter en lieu et place du destinataire légitime. Pour pallier ce risque, certains pays comme l'Estonie se sont dotés d'une carte d'identité numérique avec laquelle les électeurs peuvent s'authentifier à distance de façon sécurisée. Pour autant, cette technologie suscite de nombreuses interrogations. Dans quelle mesure ne pourrait-on pas tracer une personne à partir des données engendrées par sa carte d'identité ? Quel type de données sont stockées ? Qui pourrait y avoir accès ? Pour des questions de respect de la vie privée, le déploiement de cet outil d'authentification reste largement controversé, en particulier en France.

ALESSANDRO DELLA BELLA/KEYSTONE, ZURICH

OFFRE SPÉCIALE La Recherche

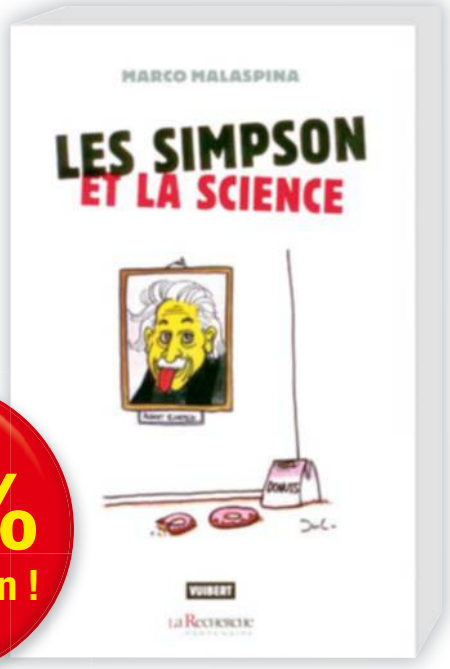
Abonnez-vous et recevez ce livre

Les Simpson et la science

À tous ceux que la science ne laisse pas indifférents - qu'ils soient profanes ou savants - Marco Malaspina propose de redécouvrir les grands problèmes scientifiques d'aujourd'hui avec humour… dans le canapé des Simpson !

L'auteur met en lumière le regard critique que porte sur la science la célèbre série télévisée.

• *Auteur : Marco Malaspina* • *Édition : Vuibert* • *Prix public : 18€.*



1 an - 10 numéros
+ 1 numéro double :
5€ seulement par mois

Plus de 30% de réduction !

BULLETIN D'ABONNEMENT

À retourner sous enveloppe affranchie à La Recherche - Service Abonnements - 4, rue de Mouchy - 60438 Noailles cedex

OUI, je m'abonne à La Recherche et je reçois le livre "Les Simpson et la science" (A69) :

☐ 10 n^{os} + 1 n° double pour **5 €** seulement par mois (*).
Je remplis le mandat de prélèvement SEPA ci-contre pour profiter de ce mode de règlement particulièrement avantageux.

☐ Je préfère règler en une seule fois **60 €** au lieu de ~~89,90~~ €.

Pour le règlement en une seule fois, je règle par :
☐ Chèque bancaire à l'ordre de La Recherche
☐ Carte bancaire

N° |_|_|_|_| |_|_|_|_| |_|_|_|_| |_|_|_|_|

Expire fin |_|_| |_|_|

Je note les 3 derniers chiffres du numéro inscrit dans la zone signature, au dos de ma carte |_|_|_|

Signature obligatoire

☐ M. ☐ Mme ☐ Mlle

Nom :

Prénom :

Adresse :

Code postal : |_|_|_|_|_| Ville :

Téléphone : |_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|

E-mail : @

Pour recevoir plus rapidement les informations relatives à votre abonnement, merci d'indiquer votre e-mail.

(*) Pour un minimum de 12 prélèvements. Au terme des 12 mois votre abonnement se poursuivra au même tarif préférentiel, et pourra être interrompu à tout moment par simple courrier.

Je peux acquérir séparément les numéros normaux au prix de 6€40, le numéro double au prix de 7€90, le livre *Les Simpson et la science* au prix de 18€. Offre réservée aux nouveaux abonnés jusqu'au 31/12/2015 et dans la limite des stocks disponibles.

Loi informatique et libertés : vous disposez d'un droit d'accès, rectification et de suppression des informations vous concernant. Elles sont destinées exclusivement à SOPHIA PUBLICATIONS et à ses partenaires sauf opposition de votre part en cochant la case ci-après ☐.

MANDAT DE PRÉLÈVEMENT **SEPA**

PLRC504

En signant ce formulaire de mandat, vous autorisez La Recherche à envoyer des instructions à votre banque pour débiter votre compte. Vous autorisez également votre banque à débiter votre compte conformément aux instructions de La Recherche. Vous bénéficiez du droit d'être remboursé par votre banque selon les modalités décrites dans la convention que vous avez passée avec elle. Toute demande de remboursement doit être présentée dans les 8 semaines suivant la date de débit de votre compte. Vos droits concernant ce mandat sont expliqués dans une notice disponible auprès de votre banque. Il s'agit d'un prélèvement récurrent : le premier prélèvement sera effectué après l'enregistrement de votre abonnement.

Créancier	**Identification du créancier**
Sophia Publications - LA RECHERCHE 8, rue d'Aboukir - 75002 Paris	FR48ZZZ440981

Inscrivez VOS COORDONNÉES (merci d'écrire en majuscules)

Nom .....

Prénom .....

Adresse .....

.....

Code Postal |_|_|_|_|_| Ville .....

Indiquez LES COORDONNÉES DE VOTRE COMPTE (disponibles sur votre R.I.B.)

IBAN - Numéro d'identification international du compte bancaire

|_|_|_|_| |_|_|_|_| |_|_|_|_| |_|_|_|_| |_|_|_|_| |_|_|_|_| |_|_|_|

BIC - Code international d'identification de votre banque

|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|

N'oubliez pas de joindre un Relevé d'Identité Bancaire (R.I.B.).

À ..... Le ...../...../.....

Signature obligatoire

Sophia Publications - SA au capital de 9 115 568 € - 562 029 223 RCS Paris
Service abonnements : ✆ France : 01 55 56 71 15 - ✆ Etranger : 00 33 155 56 71 15
E-mail : abo.recherche@biwing.fr

La Recherche
L'actualité des sciences

▲ *Isaac Newton (1642-1727)*

Nombre d'historiens du XX[e] siècle soupçonnent Isaac Newton d'avoir falsifié une lettre prouvant qu'il est celui qui a expliqué la loi de la gravitation. Mais aucune datation exacte, pourtant aisée de nos jours, n'a encore été réalisée.

Newton était-il un usurpateur ?

Par Jean-Yves Cariou, maître de conférences

Les destinataires de la lettre

▲ *Henry Oldenburg (vers 1615-1677)*

▲ *Christiaan Huygens (1629-1695)*

Le contenu d'une lettre peut-il avoir été modifié entre l'expéditeur et son destinataire ? Question saugrenue mais réellement posée autour d'une correspondance rédigée par Isaac Newton il y a plus de trois siècles. En 1686, Isaac Newton est à la veille de publier l'ouvrage qui lui conférera une gloire immortelle, *Philosophiae naturalis principia mathematica.* (souvent abrégé en *Principia*). En trouble-fête, Robert Hooke, l'un des plus éminents scientifiques de l'époque, prétend alors que les idées que Newton va exposer dans cet ouvrage lui ont été volées lors de leur correspondance de l'hiver 1679-1680. C'est faux, se défend Newton auprès de son éditeur, Edmond Halley. Et il assure qu'il peut aisément le prouver : ces mêmes idées sont énoncées dans une lettre qu'il a envoyée au physicien néerlandais Christiaan Huygens en 1673, soit quelques années plus tôt. Halley est soulagé : le triomphe de Newton est assuré.

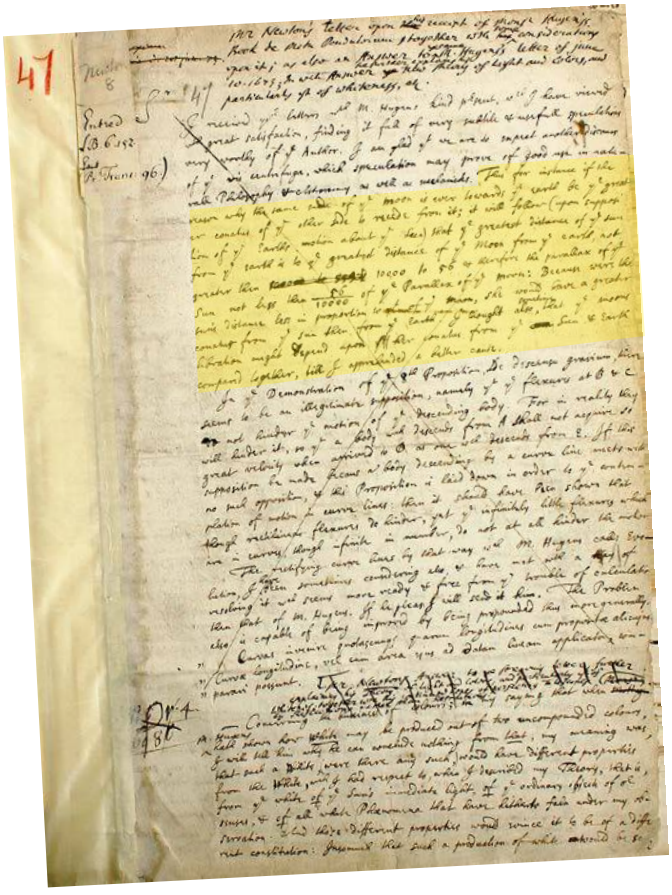
Deux siècles plus tard, en 1897, la correspondance de Huygens est en passe d'être publiée. Pourtant, l'inspection de la fameuse lettre laisse perplexe : le passage en question n'y est pas. Or il existe bel et bien dans la lettre envoyée, conservée aux archives de la Royal Society ! Il faut savoir qu'au XVII[e] siècle, les lettres savantes sont souvent acheminées par un intermédiaire. Ainsi, le 23 juin 1673, Newton n'envoie pas directement sa lettre à Huygens, mais au secrétaire de la Royal Society, Henry Oldenburg, lequel en fait une copie pour le savant néerlandais. Dans cette histoire, il y a donc deux lettres : celle rédigée par Newton, aujourd'hui conservée à Londres, et celle recopiée par Oldenburg et reçue par Huygens, conservée à Leyde, aux Pays-Bas.

Les éditeurs de Huygens savent toute l'importance accordée par Newton à dix lignes de cette lettre de 1673. Ils l'ont entre les mains, la relisent, la retournent : ces dix lignes n'y sont pas. Persévérants, ils demandent à la Royal Society un fac-similé de la lettre écrite par Newton où figure le passage tant recherché. Oldenburg aurait-il omis de le recopier ? Les éditeurs excluent un tel acte, car contraire à ses habitudes : toutes les copies qu'il a transmises à Huygens ont été certifiées. Et le passage est trop long pour avoir été sauté par inadvertance. Herbert Turnbull, éditeur de la correspondance de Newton dans les années 1950, rappelle qu'une telle différence entre une lettre reçue et une lettre envoyée constitue un cas unique dans les registres de la Royal Society.

DÉSIR DE TRIOMPHE

Newton aurait-il réécrit sa lettre après coup ? Peut-être, et même sans doute, pour I. Bernard Cohen, professeur à l'université Harvard, spécialiste et traducteur du savant britannique : *« Newton consacra énormément de temps et d'énergie à composer et faire admettre une chronologie de ses découvertes situant nombre d'entre elles antérieurement aux dates fournies par les documents historiques attestés. Probablement faut-il voir dans cette superposition à l'histoire d'une chronologie imaginaire le désir de triompher de ses adversaires lors des querelles de paternité. »*

Science Photo Library/akg-images - Pictures from History/AKG-images - The Royal Society



▲ *Cette lettre est, selon Newton, l'exacte copie de celle qu'il a envoyée à Huygens en 1673. La partie sur fond jaune serait la preuve qu'il est le père du schéma du système du monde qui fera sa renommée. Mais ce passage n'existe pas dans la lettre que Huygens a reçue.*

Que s'est-il passé avant l'apparition de cette lettre ? Dès 1666, Robert Hooke expose ses hypothèses à la Royal Society : « *Une planète continuerait tout droit selon son mouvement direct, autrement dit son inertie, et prendrait littéralement la tangente en quittant son orbite, si elle n'était pas attirée en permanence par un corps central.* » Il nomme cela une inflexion en une courbe. En 1670, Hooke rajoute : « *La force d'attraction est un facteur universel entre tous les corps célestes qui, en outre, s'identifie à la gravité terrestre* », ce qu'il publie en 1674. Il y propose un nouveau « *système du monde qui repose sur trois suppositions* » : tous les corps célestes ont une force d'attraction ou de gravitation ; tous continuent en ligne droite jusqu'à ce qu'une force les dévie en un cercle, une ellipse ou une autre courbe ; ces forces d'attraction sont d'autant plus puissantes que le corps sur lequel elles agissent est plus proche de leurs propres centres. Pour l'historien des sciences Alexandre Koyré, Hooke est, dès 1674, en pleine possession du schéma du système du monde, presque identique à celui que publiera Newton.

Fin 1679, Hooke n'a pas de raison de se méfier quand il demande à Newton son avis sur son hypothèse « *de la composition des mouvements célestes des planètes en un mouvement direct selon la tangente et un mouvement attractif vers le corps central* ». Newton lui répond qu'il n'en a jamais entendu parler (il se contredira en 1686 en parlant de « *la théorie que j'avais auparavant lue dans son livre* ») et qu'il s'en soucie autant « *qu'un campagnard de la science* ».

Début 1680, Hooke, dans un courrier à Newton, émet une supposition : « *Une attraction est toujours inversement proportionnelle au carré de la distance.* » Comme il ne parvient pas à en faire la vérification par l'expérience, il demande l'aide de Newton, dont il reconnaît la supériorité mathématique : avec cette loi d'attraction, la forme d'orbite planétaire impliquée n'est-elle pas l'ellipse qu'on sait exister ? C'est un système radicalement différent de tout ce qu'on trouve chez Newton avant cette date. Newton ne répond pas.

LA VISION DE HOOKE

Or c'est ce schéma inertie-inflexion que Newton s'apprête à publier en 1686. Quand Hooke l'apprend, il s'attend à être mentionné en préface. Et le fait savoir. Le 22 mai, Halley informe Newton de la revendication de Hooke. Cinq jours plus tard, Newton, sans se prononcer sur le fond, répond à Halley qu'il souhaite rester en bons termes avec Hooke. Enfin, un mois plus tard, son ton change radicalement. Newton récapitule à l'attention de Halley ses échanges avec Hooke, qui « *fait grand bruit* » et « *n'a rien fait* ». C'est là qu'il mentionne sa lettre de 1673 à Huygens qui prouve que son exposé est antérieur à celui de Hooke. Le 27 juillet 1686, Newton envoie une nouvelle lettre à Halley : « *Hier, je suis tombé par hasard sur une copie de la lettre à Huygens dont je vous ai parlé. Elle est entre les mains de Mr John Wickins, qui était en ce temps-là mon camarade de chambre, et est désormais pasteur de Stoke Edith près de Monmouth. Elle est donc authentique.* »

Pourquoi Newton insiste-t-il autant sur l'authenticité de sa lettre ? Et pourquoi fait-il une telle affaire des réclamations de Hooke s'il est assuré de son antériorité ? Sans doute parce que rien n'est démontré… Comme l'affirme Cohen, « *l'analyse de Hooke contient la clé du problème des mouvements célestes. Elle fut un élément capital pour l'élaboration de la mécanique céleste telle que Newton l'exposa dans ses* Principia ». Le débat entre Newton et Hooke s'est centré sur la quatrième hypothèse, la loi, plutôt que sur celle de la combinaison inertie-inflexion, et Hooke a ainsi été « *privé d'une paternité qui lui revenait pour une idée féconde et originale* ». ●●●

THE ROYAL SOCIETY LONDRES

••• Or, comme différents auteurs l'ont relevé, Newton ne se sert pas de la notion d'attraction mais attribue au contraire aux planètes une tendance centrifuge, concept cartésien comme ceux de tourbillon et d'éther qui constituent aussi les ingrédients de son système du monde d'alors. Dans ses derniers écrits avant l'échange avec Hooke, entre 1675 et 1679, il était complètement empêtré dans un système où un *« principe secret d'insociabilité »* fait que certaines choses se repoussent comme *« les éthers des tourbillons du soleil et des planètes »*, tandis que la gravité est due à un vaste cycle de condensation continuelle d'une substance onctueuse ou gommeuse, *« nourriture du soleil et des planètes »* qui descend vers eux en entraînant les corps qu'elle traverse et ainsi contrecarre leur insociabilité.

ET LA POMME ? UNE LÉGENDE ?

Pour Cohen, ce n'est qu'en 1680 *« que Newton fut converti par Hooke au concept de force centripète »*. Pour l'historien des sciences américain Richard Westfall, il n'y a pas de document où Newton utilise la notion de force centripète *« avant que Hooke ne l'en ait instruit »*. Thomas Whiteside, historien des mathématiques, porte le même jugement. Pour lui, Newton suivait un chemin cartésien marécageux jusqu'à ce que, fin 1679, Hooke lui désigne la nouvelle voie de la composition des mouvements.

Et la pomme dans tout ça? Beaucoup d'ouvrages historiques racontent qu'en 1665 ou 1666, Newton a déduit la loi de la gravitation à partir de la chute d'une pomme. Une histoire souvent qualifiée de mythe ou de légende et que Newton est le seul à raconter, comme le rapportent divers témoignages d'historiens. Newton, explique Cohen, voulut assurer sa priorité dans la découverte de la loi de l'inverse carré, *« et pour cela, il bâtit un petit scénario »* avec l'histoire de la pomme. Cohen y voit une *« invention qui faisait probablement partie de ses efforts pour faire croire qu'il avait découvert la loi de la gravitation, ou au moins ses prémices, quelque vingt ans avant la publication des* Principia *»*. Une *« preuve par la pomme »* qui tombe à point nommé en 1665, soit un an avant la communication de Hooke sur l'inflexion. En plus d'une *« preuve par la lettre »* à une date tout aussi providentielle, 1673, car un an avant la publication de Hooke. Oldenburg, mort en 1677, ne pourra pas témoigner qu'il n'a pas fait d'erreur de copiste.

Cette différence entre la lettre envoyée et la lettre reçue, et qui entraîne les soupçons d'usurpation, a été largement commentée par des historiens des sciences dans la deuxième partie du XX^{e} siècle. À l'image de Louise Patterson qui, en 1950, exprime ses doutes sur la probité de Newton. En 1968, Alexandre Koyré relève que Louise Patterson accuse Newton de falsification de documents. En 1996, Ellen Drake juge, elle aussi, que *« la copie de la Royal Society doit avoir été soignée pour produire l'effet désiré »*, même si Michael Nauenberg, professeur de physique à l'université de Californie, estime que Newton n'avait pas les moyens d'une telle falsification.

Sans preuve formelle, on peut néanmoins relever que Newton avait déjà usé de tels procédés dans d'autres circonstances : déposer des brouillons à la bibliothèque universitaire de Cambridge pour qu'ils soient pris pour la source de ses lectures en chaire ; se faire passer, contre Leibniz, pour l'auteur impartial d'un article anonyme où il parle de lui à la troisième personne. Louise Patterson disait, en 1950, qu'adhérer à la vision traditionnelle requiert une confiance dans les récits et les anecdotes fragiles du côté de Newton, et l'exclusion de la solide documentation historique favorable à Hooke.

Reste une question. Pourquoi ce mystère, connu depuis 1897, n'a-t-il toujours pas donné lieu à une investigation sérieuse? Si la lettre conservée à la Royal Society est bien d'origine, elle date de 1673, tout comme le papier et l'encre utilisés par Newton. En revanche, si cette lettre a été écrite treize ans plus tard, les méthodes scientifiques modernes sont en mesure de révéler la supercherie. Alan Shapiro, éditeur des *Optical Papers* de Newton, propose un moyen simple pour distinguer deux périodes dans les papiers du physicien. En effet, il révèle qu'aux alentours de 1675, une contremarque apparaît en plus du filigrane sur le papier qu'utilise Newton, et qu'après 1685, *« pratiquement tous les papiers achetés par Newton avaient une contremarque »*. Cette contremarque ne peut donc en aucun cas être retrouvée sur une lettre datant de… 1673. En revanche, elle a de grandes chances d'être présente sur du papier utilisé par Newton en 1686.

Peut-être suffit-il de regarder par transparence cette lettre, qui attend son analyse à la Royal Society depuis plus de trois siècles, pour enfin faire la lumière sur un épisode majeur de l'histoire des sciences et de la compréhension humaine de l'Univers. ■

Pour en savoir plus

- E. T. Drake, *Restless Genius Robert Hooke and His Earthly Thoughts*, Oxford University Press, 1996.
- I. B. Cohen, *Les Origines de la physique moderne*, Seuil, 1993.
- A. Koyré, *Études newtoniennes*, NRF, Gallimard, 1968.
- A. R. Hall, *Two Unpublished Lectures of Robert Hooke*, *Isis 42*, 219, 1951.

idées

Matière à penser P. 80
Tribune P. 84
L'œil du philosophe P. 87
Tribune P. 89

Vivre 140 ans

du fantasme à la réalité

Améliorer l'homme jusqu'à lui conférer une durée de vie hors du commun, tel est le projet énoncé par les transhumanistes dans les années 1980. Un rêve que les nouvelles technologies rendent aujourd'hui accessible. Pour certains, la société serait même prête à l'accepter. Pour le meilleur ou pour le pire ?

COLIN ANDERSON/AGEFOTOSTOCK

Matière à penser

La nouvelle condition humaine

Les transhumanistes affirment qu'il sera un jour technologiquement possible d'atteindre l'immortalité et de transcender l'homme. Faut-il les croire ?

Viviane Thivent, journaliste

Tuer la mort. Vivre sans vieillir, jamais. Augmenter à loisir les capacités de son corps. Voici certains des slogans qui s'étalent à la une des journaux, des livres ou sur Internet. Ces phrases chocs sont inspirées par la pensée transhumaniste, un mouvement qui promeut l'avènement d'un homme amélioré, immortel : une nouvelle espèce d'*Homo sapiens* appelée le posthumain. *« Ce courant de pensée était considéré comme farfelu il y a quelques décennies,* explique Laurent Alexandre, fondateur du site médical Doctissimo et d'une société de séquençage du génome, DNAVision. *Mais avec l'accélération des avancées techniques, cette idéologie est en train de gagner du terrain dans le monde. »* Une affirmation qui n'est toutefois pas corroborée par l'examen de l'évolution mondiale de l'intérêt des internautes pour ce mouvement, exceptions faites des francophones et des hispanophones, qui semblent avoir découvert cette idéologie très récemment, aux alentours de 2013. Non sans raison.

Le transhumanisme est avant tout une doctrine américaine, née à Los Angeles dans les années 1980. *« Fonder ce mouvement était le seul et unique choix logique,* se souvient l'actuelle présidente de l'ONG Humanity+, Natasha Vita-More, une enfant d'Hollywood considérée comme l'une des pionnières du transhumanisme. *À l'époque, l'activisme anti-technologies était important et personne ne se battait pour l'utilisation des technologies émergentes. Les nanotechnologies, l'intelligence artificielle ou les biotechnologies suscitaient de l'anxiété. »* Ce, alors même que ces technologies pouvaient, selon elle, représenter des solutions de premier choix, notamment contre *« la vulnérabilité biologique qui engendre le déclin de la santé humaine et une durée de vie limitée. »*

L'ABOLITION DE LA SOUFFRANCE

Cette vision de la condition humaine, très présente dans la pensée transhumaniste, s'enracine dans celle du biologiste et eugéniste britannique Julian Huxley qui en 1957 écrivait : *« La grande majorité des êtres humains (s'ils ne sont pas morts jeunes) sont affligés par la souffrance… Mais nous pouvons, à juste titre, croire qu'un champ de possibilités existe et que les limitations et les misérables frustrations de nos existences pourraient être très largement surmontées. L'être humain peut, s'il le souhaite, se transcender lui-même, non comme individu mais comme humanité. »*

Le transhumanisme a donc pour ambition de corriger ces défauts de fabrication, de parachever la création divine et de faire de l'homme son propre dieu. Mais pas seulement : *« C'est une nébuleuse où tous les fantasmes sont possibles »,* explique le philosophe Jean-Michel Besnier. Une métaphysique où se mêlent l'évolution proactive de l'espèce humaine, l'abolition de la souffrance, l'élimination du genre, la création de nouvelles galaxies ou encore la quête de l'immortalité. Un graal qui, pour les transhumanistes, peut passer par l'allongement indéfini de la vie, le transfert de l'esprit sur une machine et, de façon plus pragmatique, par la cryogénie.

Dans le monde, 300 personnes appelées les cryonics ont ainsi été congelées *post-mortem* dans l'attente d'une *« technologie médicale capable de les faire revenir en pleine santé »,* selon le site d'Alcor, leader mondial de la cryogénie. Douze mille autres attendraient leur heure. Natasha Vita-More en fait partie : *« La cryogénie est actuellement la meilleure alternative que nous ayons à la mort,* assure l'épouse de Max More, président d'Alcor. *Nous avons fait beaucoup de progrès, notamment* via *la vitrification* (*), *et nous avons même montré qu'un animal pouvait conserver sa mémoire après une cryogénie. »* L'expérience portait sur un ver nématode et n'a été relayée par aucune publication scientifique sérieuse. Car si la vitrification permet effectivement de conserver des ovocytes et des embryons humains puis de les utiliser pour une fécondation *in vitro* ou une grossesse, aucun argument ne permet de dire que cela est transposable à un organisme complexe.

« L'homme ou la femme qui vivra mille ans est déjà né(e) », assure Aubrey De Grey, un biogérontologue britannique souvent associé au transhumanisme, rapprochement que lui-même récuse catégoriquement. Et pour cause : en Europe, le mouve-

(*) La vitrification est la congélation très rapide du corps (ou effectué par le froid ou l'ajout d'anti-gel) pour empêcher la formation de cristaux et donc l'éclatement des tissus.

COLIN ANDERSON/AGEFOTOSTOCK

MARC ABEL/PICTURETANK

ment a mauvaise réputation. Il n'intéresse que des amateurs, des ingénieurs ou des chercheurs de seconde zone. Pour Natasha Vita-More, les transhumanistes seraient bien moins marginalisés outre-Atlantique : *« Considéré comme une subculture à ses débuts, notre mouvement s'est démocratisé, notamment grâce la convergence des nanotechnologies, des biotechnologies, de l'informatique et les sciences cognitives, les NBIC. »* Pointée pour la première fois en 2003 dans un rapport américain réalisé par la National Science Foundation, cette convergence ferait passer de complètement absurdes à visionnaires certaines prédictions transhumanistes. Résultat : *« Le transhumanisme n'est plus une utopie. Il devient réalité, d'où l'apparition d'hommes politiques transhumanistes »*, insiste Marc Roux, président de l'Association française transhumaniste. Aux États-Unis, un candidat à la présidence 2016, Zoltan Istvan, s'est ainsi affiché ouvertement transhumaniste.

Les industriels eux-mêmes seraient de plus en plus séduits par cette idéologie. Notamment dans la Silicon Valley. Ce soupçon pèse sur les fondateurs de Google, Sergey Brin et Larry Page, depuis la création de leur start-up de biotechnologies, Calico, en septembre 2013. Son objectif : la lutte contre le vieillissement et les maladies associées. Une volonté très médiatisée à l'époque du lancement mais qui a peut-être moins à voir avec le transhumanisme qu'avec la découverte chez Sergey Brin, cofondateur de Google, d'un gène de prédisposition à la maladie de Parkinson.

UN CŒUR ARTIFICIEL

« La plupart des gens sont transhumanistes sans le savoir. Nous sommes sur le toboggan de l'acceptation », note néanmoins Laurent Alexandre. En témoigne l'accueil fait par le grand public au cœur artificiel Carmat. Ce cœur élaboré en France a été conçu avec des biomatériaux anti-rejet et dispose de sa propre autonomie, ce qui dispense le patient greffé d'être relié à une machine. Les deux premiers patients porteurs de cette prothèse ont survécu respectivement deux mois et demi et neuf mois avec elle. Une troisième personne a été greffée en avril.

« Aujourd'hui, ce cœur ne marche pas vraiment, note Laurent Alexandre, *mais attendez quelques années et vous verrez que sa longévité atteindra dix ans, cent ans, voire plus. C'est le début du cyborg. Et tout le monde applaudit sans s'interroger sur les conséquences à long terme d'un tel dispositif. Car de la réparation de l'homme à l'augmentation, il n'y a qu'un pas. »*

Une rhétorique qui agace Michel Lévy-Provençal, fondateur de TEDx Paris, déclinaison des conférences américaines TED sur les domaines qui dessinent l'avenir. Pour ce dernier, il faut différencier l'acceptation d'une technologie par le grand public du transhumanisme lui-même : *« Les deux choses n'ont rien à voir »*, appuie-t-il. •••

> **“ Les limitations et les misérables frustrations de nos existences pourraient être très largement surmontées ”**
>
> **Julian Huxley,** biologiste

••• Ce qui met tout le monde d'accord en revanche, c'est l'accélération frénétique des découvertes à laquelle nous sommes en train d'assister. Elle rend plus crédible que jamais l'idée d'une augmentation considérable de la longévité à venir. *« On estime que le saut technologique qui a eu lieu entre 1980 et 2010 équivaut à celui qui aura lieu entre 2010 et 2020 »,* note Michel Lévy-Provençal. Et la tendance devrait s'accentuer, à l'image de ce qui s'est passé en médecine où des champs de recherche complets sont apparus cette dernière décennie. La découverte des propriétés structurantes de la matrice extracellulaire et de la plasticité des cellules souches (*) ; l'élaboration de techniques permettant de faire revenir des cellules adultes à un stade de cellule embryonnaire (les cellules iPS) a ouvert l'espoir d'une médecine régénérative (lire p. 4). Comme son nom l'indique, cette dernière consiste à régénérer des tissus, des organes en vue peut-être de les greffer, voire d'en créer de nouveaux, comme l'a montré en 2012 le Français Éric Lagasse, de l'Institut McGowan pour la médecine régénérative, à Pittsburg, aux États-Unis (1). En injectant des cellules du foie dans des ganglions lymphatiques, il est parvenu à créer chez la souris un organe hybride capable de remplacer la fonction d'un foie normal.

Des progrès ont de plus été réalisés en génétique du vieillissement, notamment *via* la découverte de DAF-2. Ce gène code un récepteur à l'insuline (IGF-1) et serait directement impliqué dans la vitesse de vieillissement… chez le ver *Caernorhabditis elegans* (2). Cela pourrait aussi être le cas chez l'homme, comme le suggèrent des travaux menés sur des personnes atteintes d'une forme particulière de nanisme et chez lesquelles l'expression du récepteur IGF-1 est modifiée. Ces personnes auraient une plus grande espérance de vie mais surtout, elles ne développeraient aucune des maladies liées à l'âge : ni cancer, ni Alzheimer. *« Nous sommes en train de décrypter le mécanisme du vieillissement »,* assure ainsi Frédéric Saldmann, médecin qui travaille sur le rat taupe nu, rongeur capable de vivre 30 ans, soit *« l'équivalent de 600 ans chez l'homme ! »*, et chantre de l'amélioration de longévité par l'hygiène de vie.

(*) Les cellules souches sont des cellules indifférenciées qui se caractérisent par leur capacité à générer des cellules différenciées, c'est-à-dire ayant une fonction tissulaire précise.

UN PRINCIPE TROP PERMISSIF

De fait, des travaux pointent les bienfaits sur la durée de vie de la restriction calorique (le « manger moins ») ou de la très radicale suppression des organes reproducteurs, en tout cas sur les animaux. Plus récemment, en 2014, Amy Wagers, de l'Institut des cellules souches de Harvard, a publié une étude montrant qu'il était possible de rajeunir le cœur d'une souris âgée en le connectant au circuit sanguin d'une très jeune… ou en injectant du GDF-11, une protéine que le rongeur cesse de sécréter avec l'âge (3). Le processus de vieillissement pourrait-il donc être inversé ?

Aujourd'hui, cela tient plus du fantasme que de la réelle piste de recherche. Mais si l'on ajoute à cela les progrès faits en intelligence artificielle, en nanotechnologie ou en robotique, on imagine sans peine l'infinité d'interventions qui pourraient être menées pour réparer ou améliorer l'humain. *« Faute de comprendre ces nouvelles technologies, les politiques sont dépassés et se laissent guider par des fantasmes qui parfois rejoignent ceux du transhumanisme, d'où le financement de projets comme le cerveau artificiel,* relève Jean-Michel Besnier. *Ils laissent les rennes, peut-être pas au transhumanisme, mais à l'innovation, à une vision scientiste du progrès. »*

« L'utilisation du feu, de l'agriculture, voire de la vaccination ont déjà modifié notre corps, ajoute Marc Roux. *Et aujourd'hui, on prend conscience que l'on peut agir sciemment et de façon rapide sur notre évolution* via *l'usage du génie génétique ou des implants. »* C'est pourquoi il est, selon lui, primordial d'anticiper les conséquences de tel ou tel progrès sur le fonctionnement de la société. Le seul principe de précaution est pour lui trop sclérosant. *« Ce principe est aussi trop permissif puisque, avec le temps, les comités de bioéthique ont tendance à accepter toutes les transgressions »,* renchérit Laurent Alexandre. Il serait donc temps de changer d'approche, d'avoir une vision à plus long terme, d'utiliser la prospective pour éventuellement interdire en amont l'usage de certaines techniques.

« Même une feuille de route hypothétique vaut mieux que de s'en remettre au hasard. Tout entrepreneur sait cela », s'amuse Natasha Vita-More. *« Il est urgent que les citoyens et l'État s'emparent de ces questions afin que l'on ne se retrouve pas devant le fait établi par le secteur privé, dans un monde où par exemple les inégalités seraient creusées et où l'accès à une vie plus longue et en meilleure santé ne serait réservée qu'à une élite »,* conclut Marc Roux. Et bizarrement, sur ce point, tout le monde semble s'accorder. ■

(1) J. Komori *et al. Nature Biotechnology, 30,* 976, 2012.
(2) K. Kimura *et al., Science, 277,* 942, 1997.
(3) L. Katsimpardi *et al., Science, 344,* 630, 2014.

Le cas asiatique

C'est en Asie que le transhumanisme serait le mieux accepté car cette idéologie est moins transgressive que dans la culture judéo-chrétienne. Une expérience conduite en Chine vise ainsi à améliorer le quotient intellectuel des générations futures. Pour ce faire, des chercheurs de l'Institut de génomique de Beijing, à Shenzhen, ont entrepris de séquencer le génome de 2000 des plus brillants esprits mondiaux afin d'identifier des gènes de l'intelligence, si tant est qu'ils existent, et de sélectionner les embryons les plus prometteurs. Pour le moment, en vain.

Pour en savoir plus

- « Réparer le cœur », *La Recherche 459,* janvier 2012, p. 36.
- « Vers la médecine régénérative », *La Recherche 451,* avril 2011, p. 38.

COLIN ANDERSON/AGEFOTOSTOCK

www.magazine-litteraire.com

En vente actuellement

Tribune

de François Berger, Franck Lethimonnier et François Sigaux

François Berger est neurologue. Il dirige l'équipe Inserm-Grenoble université Clinatec Lab, dont l'objectif est de développer des dispositifs technologiques innovants pour le cancer et les pathologies neurodégénératives.

Franck Lethimonnier est chercheur au CEA et à l'Inserm. Ses recherches consistent, entre autres, à développer de nouvelles techniques d'acquisition en imagerie par résonance magnétique.

François Sigaux est professeur d'hématologie à l'université Paris-Diderot et praticien hospitalier à l'APHP. Ses recherches portent sur la génomique et la bioinformatique des leucémies.

« Tuer la mort est un crime contre l'humanité »

En cent cinquante ans, l'espérance de vie a été multipliée par deux. Les mesures de santé publique, l'apparition des antibiotiques et l'amélioration des conditions de travail ont joué un rôle majeur dans l'allongement de la durée de vie. L'introduction des thérapies ciblées et de l'immunothérapie a révolutionné la prise en charge du cancer. Cependant, en France, 350 000 nouveaux cas de cancer sont détectés chaque année et 150 000 patients meurent encore de cette maladie. Le vieillissement de la population, quant à lui, a fait apparaître des pathologies liées à l'âge. L'impact socio-économique des démences sera considérable – le coût total des maladies du cerveau était déjà estimé en 2004 à 386 milliards d'euros – et aucun traitement curatif n'est disponible pour ces patients.

Face à ce besoin médical majeur et aux verrous observés dans les approches pharmacologiques classiques, des approches technologiques nouvelles se sont développées. Elles contribuent de façon très significative aux progrès en santé, tant au niveau du diagnostic que de la thérapie. Les progrès de l'électronique et des micro-nanotechnologies permettent de doter les patients de dispositifs médicaux miniaturisés, intelligents et multitâches. L'amélioration des capteurs et des traceurs permettent à l'imagerie de détecter les pathologies de façon plus efficace ; le séquençage du génome est accessible à une utilisation clinique de routine ; des implants cérébraux permettent de traiter les symptômes de la maladie de Parkinson, des interfaces cerveau-machine aident certains patients tétraplégiques ; l'évolution des biomatériaux et des approches dans le domaine de la médecine régénératrice ouvrent de nouvelles voies thérapeutiques…

Un champ industriel et médical considérable émerge donc, conduit par des industriels venant de l'informatique, de l'électronique et des nanotechnologies… et qui étaient jusqu'alors absents de la santé. Le transfert de leurs innovations technologiques aux patients se réalise dans un cadre très rigoureux. Il implique une validation des technologies sur l'animal, la démonstration de la compatibilité des matériaux avec l'organisme et la production industrielle d'un dispositif robuste. La première utilisation chez l'homme à travers un essai clinique se fait à l'issue d'une analyse du bénéfice/risque et du consentement éclairé du patient. Toute la chaîne doit répondre à un contrôle des agences réglementaires et éthiques. Elle est longue, coûteuse et périlleuse.

L'INTÉGRITÉ DE L'INDIVIDU MENACÉE

À l'opposé de cette démarche, le transhumanisme s'est emparé des progrès technologiques pour chercher à construire un humain amélioré, hyperperformant et immortel. La banalisation de cette idéologie doit nous alarmer. Sulfureux et infréquentables il y a cinq à dix ans, les promoteurs du transhumanisme sont désormais éditorialistes dans des journaux ayant pignon sur rue, ou directeurs d'entreprises majeures comme Google. L'objectif de « tuer la mort » est ainsi affiché en première page du *Time* sans qu'aucun questionnement éthique ne soit ébauché avec l'annonce de l'immortalité en 2040. Or derrière tout cela se cache un projet idéologique et industriel qui s'élève contre bon nombre de principes éthiques.

COLIN ANDERSON/AGEFOTOSTOCK - DR -FRANÇOIS GUÉNET/INSERM

Le transhumanisme est un concept erroné : un humain doté d'une mémoire surdimensionnée ne serait pas fonctionnel. Il faut dormir et savoir oublier pour bien mémoriser, et la maladie d'Alzheimer – qui n'existe que chez l'homme – est probablement en partie la rançon de son intelligence. La pathologie et la mort sont le reflet des erreurs indispensables à la fonctionnalité complexe et à l'évolution de l'humanité. L'immortalité humaine est incompatible avec une certaine stabilité de l'évolution. Les hommes doivent mourir et la médecine consiste aussi à accompagner la mort : l'homme est mortel pour maintenir l'intégrité de l'humanité.

Bien sûr, la frontière peut parfois paraître floue entre la prolongation indéfinie de la vie telle qu'elle est prônée par le transhumanisme et les mesures prises par les médecins pour prolonger une vie digne chez les patients, par exemple, ou encore les mesures utiles de santé publique qui ont abouti à l'allongement de la durée moyenne de la vie. Ces exemples fournissent à ceux qui en ont une lecture superficielle une preuve de concept à certains arguments du transhumanisme. La différence entre les deux démarches est toutefois considérable : les actions des médecins ne modifient en aucune façon l'intégrité de l'individu. De même que la médecine n'a pas pour objet de modifier l'espèce humaine mais de se concentrer sur les individus tels qu'ils sont.

LE CORPS CONNECTÉ MARCHANDISÉ

En dehors de l'immortalité, une des promesses des transhumanistes consiste à améliorer notre bien-être. Pourquoi ? Parce que ce concept leur permet de démédicaliser l'usage des technologies pour la santé, autrement dit de développer des dispositifs médicaux en dehors des contraintes de sécurité et d'éthique de la recherche biomédicale. C'est cette notion de bien-être qui justifie par exemple le développement dérégulé de dispositifs médicaux connectés pour améliorer les performances des individus sains. Les bracelets connectés compteurs de pas, par exemple, incitent à plus d'activités sans aucune justification médicale. On peut imaginer que cette augmentation non contrôlée de l'activité physique entraîne des effets secondaires comme des infarctus du myocarde chez des sujets atteints de pathologie coronarienne asymptomatique. C'est chez l'homme sain que le ratio bénéfice/risque est le plus important, justifiant un encadrement éthique et réglementaire incontournable.

Or il est important de définir les frontières entre le normal et le pathologique : dès lors qu'une intervention diagnostique ou thérapeutique est effectuée chez un sujet sain, il rentre dans le champ de la médecine. Il faut s'interdire d'intervenir sur un

> **“ Il faut s'interdire d'intervenir sur un sujet sain sans un contrôle médical, éthique et sociétal rigoureux ”**

sujet sain sans un contrôle médical, éthique et sociétal rigoureux. À travers les objets connectés au corps humain, des données d'une importance considérable sont en outre enregistrées. Elles contiennent des signatures potentielles de pathologies, mais aussi les aspects les plus intimes d'un individu et doivent être protégées car elles sont la propriété de l'individu. La banalisation de la terminologie de « santé connectée » laisse penser que cette connexion est indispensable. C'est faux. Le progrès est celui de l'apport de l'électronique et du digital pour la santé dont les aspects connectés ne sont qu'une partie, comme la télémédecine. La connexion du corps et la communication de ses informations exposent aussi à de nouveaux effets secondaires à travers par exemple « le hacking » potentiel. Elles doivent donc être évitées et protégées au maximum, même si certains rêvent de posséder cette information d'une importance considérable.

Le projet transhumaniste pose également la question de l'égalité de l'accès à l'innovation technologique. L'amélioration de l'homme – conçue comme une marchandisation du corps sain et dont les performances sont accrues sur demande – amène au développement d'un produit dont le coût risque de faire l'objet des pires surenchères. Pourquoi avoir choisi de le développer en dehors de la médecine ? Là encore, pour éviter la régulation des coûts au bénéfice d'un accès équitable des citoyens aux progrès thérapeutiques ! C'est d'autant plus dommage que le modèle de l'industrie de l'électronique permet au contraire une diffusion à bas coût de certaines technologies pour un très grand nombre d'utilisateurs. C'est d'ailleurs ce que promeut Bill Gates au travers de sa fondation.

FAVORISER L'ACCÈS DES PATIENTS À L'INNOVATION

Les technologies pour la santé sont une opportunité majeure pour les patients. Un modèle de développement éthique, raisonné, socialement accepté et économiquement équitable est possible. L'association des ingénieurs, des médecins, des scientifiques, des industriels, des associations de patients •••

••• et des chercheurs en sciences humaines et sociales, comme elle s'ébauche en France autour des instituts de recherche, montre que ce modèle fonctionne avec succès au bénéfice des patients.

Nous avons l'obligation éthique de réagir violemment à la banalisation de l'idéologie transhumaniste qui, au même titre que le clonage reproductif, fait prendre un risque majeur à l'humanité. La peur des dérives suscitées par les partisans du transhumanisme risque en effet de provoquer des réactions sociétales qui vont à l'encontre du développement de l'innovation technologique. L'adoption d'un principe de précaution « réactionnaire » risquerait de bloquer tout développement technologique. Il nous ramènerait à une société moyenâgeuse.

Faut-il faire évoluer l'encadrement réglementaire et éthique actuel ? Non, s'il est respecté, il est largement suffisant pour éviter les dérives. Ajouter des normes et des lois ne ferait que ralentir l'accès des patients en échec thérapeutique à l'innovation technologique. En revanche, il faut à notre sens davantage surveiller et rendre compte.

L'Agence de la biomédecine a pour objectif d'observer de façon précoce les impacts de l'innovation dans le domaine de la greffe, de la procréation, de l'embryologie et de la génétique humaine, tout en organisant une offre de soin de qualité et équitable. Son rôle a été étendu à la veille dans le développement des connaissances et des techniques en neurosciences. Il serait important d'élargir encore son domaine d'activité afin d'assurer une analyse rigoureuse de l'impact de l'innovation apportée par les technologies pour la santé et d'organiser une offre de soin de qualité et équitable.

Enfin, il est fondamental de renforcer l'éducation et l'accès de chacun à une information transparente et simple sur les potentiels et les limites des technologies. Cela permettra à tous de disposer d'éléments suffisants pour se forger une opinion et un regard critique vis-à-vis de la banalisation du transhumanisme. ■

COLIN ANDERSON/AGEFOTOSTOCK

Le magazine des passionnés d'histoire

- Géopolitique d'un empire menacé
- Les invasions barbares ont-elles eu lieu ?
- 410 : le sac de Rome comme si vous y étiez
- La faute aux chrétiens ?
- Le spectre de la décadence

L'œil du philosophe

Ce que cache le désir d'immortalité

La recherche d'immortalité chère aux transhumanistes met à mal la nature humaine. Tout le contraire du désir d'éternité, qui conduit l'homme à une quête spirituelle plutôt qu'à une survie infinie.

Jean-Michel Besnier

Faut-il vouloir « tuer la mort »? La question ne paraît plus absurde depuis l'annonce du projet de l'entreprise de biotechnologies Calico (California Life Company), fondée par Google en 2013. Cette société affiche l'ambition d'en finir avec le vieillissement et les maladies qui lui sont associées. Mais elle consent – relayée par la publicité de grands médias qui alimentent la conviction, à la suite d'un dossier du *Time* - qu'elle *« résoudrait »* bientôt la mort. À cette illusoire revendication d'immortalité entretenue par le transhumanisme, il est urgent d'opposer le désir d'éternité que les philosophes associent à l'humanisme issu du monde gréco-latin. La confusion entre les deux serait en effet l'indice de la défaite de la culture occidentale. Hannah Arendt en avait identifié le risque dans un chapitre de son livre *Condition de l'homme moderne* intitulé justement : « Éternité contre immortalité » (éditions Calmann-Lévy, 1983, p. 53-57). Son argumentation reçoit un singulier relief à l'heure où se déchaîne l'exploitation fantasmatique de certaines découvertes biologiques (les cellules souches totipotentes induites, par exemple) ou de programmes technoscientifiques d'envergure hyperbolique (le cerveau artificiel, par exemple).

La thèse selon laquelle les technosciences seraient sur le point de réaliser les aspirations les plus fondamentales de •••

▲ Mihama, *sculpture de Keizo Ushio, 1990, Mihama Fukui, Japon.*

COLIN ANDERSON/AGEFOTOSTOCK - KEIZO USHIO

L'œil du philosophe

Former le projet de la mort de la mort ravalerait l'humanité à son seul fonctionnement métabolique

••• l'humain n'a jamais mieux révélé sa brutalité que dans l'indifférence qu'elle témoigne à la dimension symbolique attachée à la mort. Elle donne à imaginer qu'il n'est d'autre effort chez les mortels que d'obtenir la condition que les Grecs attribuaient aux animaux et aux dieux. Immortels, les animaux le sont pour autant qu'ils sont de simples spécimens seulement capables de se reproduire et de composer une espèce sans limite temporelle assignable. Immortels, les dieux le sont par définition. La mortalité, écrit Arendt, *« c'est se mouvoir en ligne droite dans un univers où rien ne bouge si ce n'est en cercle »* - univers que seuls partagent les animaux et les dieux. Mais cette mortalité qui a pu paraître longtemps comme le privilège des humains est devenue l'équivalent d'une maladie dont la médecine et les biotechnologies doivent nous débarrasser.

RÉPÉTITION ET IMMOBILITÉ

Pour y parvenir, la perspective de substituer le clonage à la reproduction sexuée s'offre comme une solution ultime. Les philosophes savent qu'elle réfuterait l'idée qu'on se fait de l'homme en Occident : un être par nature inachevé, mais pour cette raison libre de se construire et de réaliser avec ses semblables une histoire universelle que les religions conçoivent comme destinée à racheter un péché originel. Bref, former le projet de la mort de la mort relèverait nécessairement d'une intention d'en finir avec la représentation culturelle que l'humanité s'est donnée d'elle-même, pour privilégier une vision qui la ravalerait au seul fonctionnement métabolique de l'animal, c'est-à-dire au cercle de ses réactions vitales et aux boucles rétroactives de son organisme. Les technologies dont le transhumanisme a le culte peuvent-elles faire mieux qu'animaliser ou machiniser l'humain, en minimisant la part en lui des activités symboliques et langagières ? L'immortalité qu'elles promettent peut-elle être faite d'autre chose que de répétition et d'immobilité ? L'obsession de porter la longévité à l'infini, de réduire la vie à une survie continuée, est bel et bien mortifère, si elle entend conjurer le hasard, l'aventure et le risque qui font l'humain. Le poète indien Rabindranath Tagore traduirait le rejet de cette obsession, supposée universellement partagée à en croire les technoprophètes : *« Et parce que j'aime cette vie, je sais que j'aimerais aussi bien la mort. »*

Il serait certes superficiel d'ignorer que l'humain a toujours envié la condition des dieux. Les moyens mis en œuvre pour atteindre l'immortalité sont eux-mêmes une partie essentielle du processus d'humanisation qui caractérise la culture. Arendt rappelle que les Grecs considéraient que les hommes disposaient de trois moyens pour immortaliser leur séjour dans l'histoire, c'est-à-dire pour remédier à leur finitude : les œuvres, les exploits et les paroles. La mythologie mobilise ces moyens, en déployant le récit de la tentative pour transcender ce qui, sans la vocation des héros, ne serait qu'histoire éphémère et sans gloire. La mort est, en ce sens, un défi qui aiguise l'appétit de croissance, ce *« vouloir-vivre »* que Nietzsche nommait aussi *« volonté de puissance »*. Reste que la réalisation de cette ambition humaine de s'arracher au métabolisme biologique qui garantit aux animaux leur reproductibilité indéfinie, tout en conquérant une immortalité divine par des actes hors du commun, ne pouvait qu'être exceptionnelle. Autant peut-être que le sera, dans un avenir proche, la production d'un homme augmenté, grâce aux adjuvants technologiques seulement accessibles aux nantis. Au contraire de l'immortalité, l'éternité préserve aux humains la place qui est la leur, entre les animaux et les dieux. Platon et le christianisme en firent la découverte : l'homme est le seul être vivant capable de solliciter sa vie intérieure pour s'abstraire du temps qui passe et l'immobiliser en quelque sorte. L'éternité est devenue la promesse, en Occident, de cette conversion philosophico-religieuse qui impose de refouler le corps et donc l'animalité en soi-même, aussi bien que de tourner le dos aux affaires trivialement humaines. L'accès à l'intemporel parut à ce prix et réservé à celui qui puise ses forces dans les ressources de l'esprit. L'éternité propulse hors du temps, en une extase que la science elle-même peut promettre, ainsi que le pensent aussi les mystiques orientales. Le désir d'éternité devient dès lors le propre de l'humain quand celui-ci ne se dérobe pas à son existence biologique mais en utilise les tensions et contrastes comme un défi proprement spirituel. Un posthumain débarrassé de la naissance, de la maladie, de la souffrance, du vieillissement et de la mort, y échapperait assurément. Platon décrit la condition humaine avec les traits du dieu Eros, qu'il fit naître sous le signe de la beauté (Aphrodite), d'une mère indigente (Pénia) et d'un père plein de ressources (Poros). Réunissant symboliquement la fragilité, l'inventivité et la quête de l'absolu, la nature « érotique » de l'homme devrait-elle se laisser réduire à l'instinct de conservation, auquel se borne finalement l'immortalité des transhumanistes ? Reste seulement à savoir si la cause de l'Esprit, même exemptée du désir ascétique d'éternité, peut encore être source de mobilisation à l'ère de la convergence technologique… ■

Pour en savoir plus

■ Jean-Michel Besnier, *L'Homme simplifié : le syndrome de la touche étoile*, Fayard, 2012.

COLIN ANDERSON/AGEFOTOSTOCK

Tribune
de ***Laurent Alexandre,*** *chirurgien-urologue**

« Les transhumanistes ont gagné sans livrer bataille »

La victoire des transhumanistes est prévisible. Elle aura trois causes : l'incroyable puissance de ses partisans, la sympathie de l'opinion et la nécessité de faire jeu égal avec les machines.
Le terme « transhumanisme » a été créé dès 1957 par Julian Huxley, le frère de l'auteur du *Meilleur des mondes*.
Trois objectifs caractérisent ce mouvement : permettre l'immortalité, augmenter les capacités humaines et développer l'intelligence artificielle (IA). À partir de 1990, les chercheurs réalisent le potentiel des NBIC dans cette optique transhumaniste. Ensemble, les nanotechnologies (N), la biologie (B), l'informatique (I) et les sciences cognitives (robotique, IA et neurosciences) (C) permettent d'envisager la réalisation de ces projets. Selon les transhumanistes, l'homme du futur sera un organisme prototype, voué à se perfectionner en permanence comme la version bêta d'un logiciel. Ils soutiennent, en outre, l'idée que chaque citoyen doit pouvoir décider seul des modifications qu'il souhaite apporter à son cerveau, à son ADN ou à son corps.
Pourquoi la victoire des transhumanistes est-elle crédible ? Le premier élément est mal connu en France : un lobby transhumaniste est déjà à l'œuvre, qui veut changer l'humanité grâce aux NBIC. Ce lobby est centré sur les rives du Pacifique, de la Californie à la Chine et à la Corée du Sud, à proximité des industries NBIC, qui deviennent le cœur de l'économie mondiale. La Nasa et Arpanet, ancêtre militaire américain d'Internet, ont été aux avant-gardes de ce combat. Google, l'un des principaux architectes de cette révolution, soutient activement le transhumanisme, notamment en parrainant l'Université de la Singularité qui forme les spécialistes des NBIC et que Ray Kurzweil, le « pape » du transhumanisme, dirige. Convaincu que les NBIC vont faire reculer la mort de façon spectaculaire dès le XXIe siècle, Ray Kurzweil a été embauché par Google comme ingénieur en chef pour faire du moteur de recherche la première intelligence artificielle. Google a en outre créé Calico, qui entend explorer des voies technologiques jamais envisagées pour retarder puis « tuer » la mort. La transformation de Google en un conglomérat nommé Alphabet va augmenter sa force de frappe dans le domaine des NBIC, alors même que le moteur de recherche est déjà, par exemple, le leader mondial de la robotique. Dans un entretien accordé à Bloomberg, Bill Marris, directeur du fonds d'investissement de Google (Google Ventures), a déclaré vouloir investir 425 millions de dollars à travers cette structure, dans la prolongation de la vie. *« Si vous me demandez si l'on pourra vivre 500 ans, la réponse est oui »*, a-t-il déclaré.

DES INNOVATIONS TRANSGRESSIVES DE MIEUX EN MIEUX ACCEPTÉES

Second élément en faveur de ce mouvement : l'opinion publique est devenue transhumaniste, quoiqu'elle l'ignore. Les transhumanistes ont conquis la population sans livrer bataille : l'opinion accepte toutes les manipulations technologiques de l'Homme. Quelques exemples récents : une Suédoise de 36 ans née sans utérus a accouché d'un petit garçon ; le Parlement britannique autorise des bébés ayant trois parents génétiques ; l'administration américaine a autorisé les implantations de bras bioniques directement branchés sur les nerfs des amputés. En 2013, en France, l'équipe du professeur José-Alain Sahel implantait une rétine artificielle à une patiente aveugle et le premier cœur artificiel Carmat était implanté. Le premier cyborg a été unanimement applaudi par la société française.
Les innovations technologiques, pourtant de plus en plus spectaculaires et transgressives, sont acceptées avec une facilité croissante. Nous devenons, sans en être conscients, des transhumains, c'est-à-dire des hommes technologiquement modifiés. La plupart d'entre nous acceptent la révolution NBIC pour moins vieillir, moins souffrir et moins mourir : « plutôt transhumain que mort ! »
Le transhumanisme semble avoir gagné la bataille, alors même que personne ne connaît ce terme.
Par ailleurs, de plus en plus de chercheurs s'affichent transhumanistes. En France, par exemple, Pierre-Marie •••

JEAN CHISCANO

••• Lledo, spécialiste des cellules souches cérébrales, a fait son *outing* transhumaniste dans un entretien au *Monde*. À la question « faut-il craindre ou se réjouir de l'arrivée d'interfaces cerveau-machine ? », il répond : *« Personne n'est choqué par le port de lunettes, mais la société a encore du mal à accepter qu'un individu puisse être un cyborg. Ces craintes sont d'autant plus présentes que la plupart des recherches se font loin de nous, aux États-Unis ou en Asie. Pourtant, nous sommes déjà entrés dans l'ère du transhumain. Il faut accepter le progrès sous réserve qu'il soit équitable. »*
Est-ce à dire qu'il n'y aura pas d'opposition politique au progrès médical ? Sans doute que si. Mais tout porte à croire qu'elle ne sera pas de taille à arrêter l'adoption inconditionnelle et enthousiaste des nouvelles biotechnologies. L'échiquier politique se reconfigure au XXIe siècle selon un axe nouveau, substituant l'opposition entre bioconservateurs et transhumanistes au clivage gauche-droite désormais dépassé. Des rapprochements inattendus apparaissent. Ainsi, José Bové était jusqu'à présent un militant d'extrême gauche. Dans le nouvel ordre biopolitique, il se retrouve avec les catholiques ultra-bioconservateurs. Il est résolument contre la fécondation

“ Allons-nous, sans le moindre débat, renoncer à l'Humanité telle que nous la connaissons ? ”

in vitro pour les couples hétérosexuels stériles ou homosexuels, et il s'oppose aux thérapies géniques pour le traitement des maladies génétiques. Il a déclaré, le 1er mai 2014, sur la chaîne catholique KTO : *« Je crois que tout ce qui est manipulation sur le vivant, qu'il soit végétal, animal et encore plus humain, doit être combattu. »*
José Bové est plus conservateur que Ludovine de La Rochère, présidente de La Manif pour tous, favorable à ces technologies. Les NBIC vont-elles faire imploser les partis politiques traditionnels ?
L'intelligence artificielle va devenir le troisième et principal facteur d'acceptation des fantasmes transhumanistes. L'explosion des capacités informatiques rend probable l'émergence d'une IA supérieure à l'intelligence humaine. Gafa (Google, Apple, Facebook, Amazon) ainsi qu'IBM investissent massivement dans ce domaine. Google est l'entreprise la plus avancée. Selon Ray Kurzweil, une intelligence artificielle dotée d'une conscience devrait écraser l'intelligence humaine dès 2045 en étant un milliard de fois plus puissante que la réunion de tous les cerveaux. Bien sûr, cette perspective inquiète. Elon Musk, fondateur de Tesla, expliquait récemment : *«Nous devons faire très attention avec les intelligences artificielles. Elles sont potentiellement plus dangereuses que les armes nucléaires. J'espère que nous ne sommes pas juste le disque de démarrage biologique pour une superintelligence numérique. Malheureusement, cela semble de plus en plus probable. »*

ÊTRE À LA HAUTEUR DES MACHINES

Il sera trop dangereux d'être (trop) inférieur aux machines, au risque de devenir leurs esclaves dans un scénario à la *Matrix*. L'*enhancement* cérébral sera-t-il l'ultime outil de l'humanité pour éviter sa vassalisation ? Ray Kurzweil a déclaré que nous utiliserions des nanorobots branchés sur nos neurones pour nous augmenter dès 2035. Il invite les humains à se préparer à ce qu'il appelle l'*hybrid thinking*, le mélange de notre pensée biologique et de celle issue de nos implants intracérébraux. L'informatique et la neurologie ne feront qu'un ! Pour être à la hauteur des automates, Google propose de nous hybrider avec l'intelligence artificielle : devenir cyborg pour ne pas être écrasé par l'IA ! Fusionner avec l'IA pour éviter d'être exterminés par elle revient bien à éliminer l'Homme 1.0 biologique. L'IA sera donc à terme le plus sûr vecteur de l'adoption du transhumanisme.
Allons-nous, sans le moindre débat, renoncer à l'Humanité telle que nous la connaissons ? L'idéologie démiurgique est sans limites : certains transhumanistes, comme le philosophe français Clément Vidal, souhaitent que la science se consacre à combattre la mort thermodynamique de l'Univers !
En quelques décennies, nous aurons radicalement modifié notre rapport aux technologies, à la mort, à l'intelligence, aux savoirs… Mais nous n'avons pas réfléchi à la civilisation d'après. C'est pour cela que Bill Gates a déclaré récemment au sujet de l'intelligence artificielle : *« Je ne comprends pas que les gens n'aient pas peur. »* Qui est capable d'encadrer le pouvoir que les NBIC vont donner aux organisations transhumanistes ? ■

* **Laurent Alexandre,** fondateur du site médical Doctissimo, dirige aujourd'hui la société de génomique qu'il a créée, DNAVision, spécialisée dans le séquençage personnalisé de l'ADN. En 2011, il a publié *La Mort de la mort,* aux éditions JC Lattès, dans lequel il analyse l'impact des biotechnologies sur l'humanité.

COLIN ANDERSON/AGEFOTOSTOCK

JUSQU'À
100 €
OFFERTS
POUR LES MOINS DE 30 ANS*

Votre vocation fait votre fierté, la nôtre est de vous assurer.

En tant qu'agent du service public, vous vous engagez pour les autres, alors GMF s'engage pour vous en vous proposant, par exemple, d'assurer votre véhicule même lorsque vous l'utilisez pour des déplacements professionnels, sans supplément de cotisation. Et pour aller plus loin, GMF propose des garanties spécifiques liées à votre fonction : une garantie perte de revenu (traitement et primes) en cas d'arrêt de travail, des solutions d'épargne sûres et disponibles pour commencer à préparer votre retraite.

Rejoignez GMF - 1er assureur des agents des services publics.

Pour en savoir plus rendez-vous sur www.gmf.fr

GMF
ASSURÉMENT *Humain*

*50 € pour l'assurance Auto Pass et 50 € pour l'assurance Santé Pass. Offre réservée aux jeunes agents des services publics de moins de 30 ans, la 1ère année, à la souscription d'un contrat d'assurance auto. Offre valable jusqu'au 31/12/2015.

LA GARANTIE MUTUELLE DES FONCTIONNAIRES et employés de l'État et des services publics et assimilés - Société d'assurance mutuelle - Entreprise régie par le Code des assurances. R.C.S. Paris 775 691 140 - Siège social : 76, rue de Prony - 75857 Paris Cedex 17 et sa filiale GMF Assurances. Adresse postale : 45930 Orléans Cedex 9.

MUSÉE DU QUAI BRANLY
là où dialoguent les cultures
L'ETHNOLOGIE EN FÊTE
AU MUSÉE DU QUAI BRANLY
SEPIK, Arts de Papouasie-Nouvelle-Guinée
Exposition · 27/10/15 - 31/01/16
ESTHÉTIQUES DE L'AMOUR, Sibérie extrême-orientale
Exposition · 03/11/15 - 17/01/16
LA FÊTE DE LA SCIENCE 07/10/15 - 17/10/15
Conférences · Rencontres · Projections · Visites guidées · Ateliers
Et toute l'année
Expositions · Université populaire du quai Branly ·
Ateliers en famille · Conférences · Colloques scientifiques
www.quaibranly.fr
Figurine. Océanie © musée du quai Branly, photo Thierry Ollivier, Michel Urtado

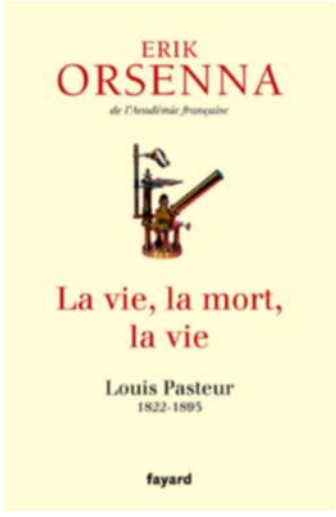
Le livre du mois

La Vie, la mort, la vie

d'Erik Orsenna

« Quel culot ! » ai-je pensé en recevant ce livre. Comment peut-on faire mieux que les excellentes biographies déjà consacrées à « l'ange de la science » ? Que peut-on écrire de plus sur Pasteur ? Puis je me suis laissé guider par la douce mélodie du récit d'Erik Orsenna.

Il n'y a pas de ville dans le monde qui ne possède une rue, une école, une statue, un hôpital ou une institution portant son nom ! Pourtant, rien ne prédestinait Louis Pasteur, un modeste professeur de chimie, à laisser une empreinte durable sur la biologie et la médecine. Il a ouvert l'ère « pastorienne » qui va changer les mœurs et les lois. Son œuvre sauvera des millions de vies par l'hygiène et la vaccination. Son génie tient à l'universalité de sa pensée. Montre-t-il la déviation de la lumière polarisée par des cristaux du tartre des tonneaux de vin, que le jeune normalien conclut que l'asymétrie moléculaire constitue la seule différence chimique entre la matière morte et celle qui vit, jetant ainsi un regard inattendu sur l'origine de la vie. Qu'il découvre que la fermentation est *« un phénomène corrélatif de l'acte de vie »* dû à des bactéries et des levures, et qu'il prouve que l'air est contaminé par des micro-organismes, et le voici mettant à bas la théorie millénaire de la génération spontanée d'Aristote. Qu'il étudie une épidémie chez les vers à soie, et il nous démontre que les germes sont à l'origine de la contagion et des infections !



C'est tout cela qu'Erik Orsenna nous raconte, avec son écriture claire, riche, parfois enjouée ou badine. Il nous mène par le bout du nez à la découverte d'un Pasteur intime, artiste, bon fils, bon mari, père aimant qui pleure ses trois enfants morts. Un être très sensible sous sa carapace, un travailleur acharné jusqu'à son dernier souffle, malgré une attaque cérébrale à 45 ans.

Mais on saura gré à l'auteur qui chérit son personnage de prendre ses distances avec la légende. Malgré l'admiration qu'il lui voue, il n'oublie pas ses travers : son ego qui lui faisait parfois utiliser les résultats de ses collaborateurs ; son conservatisme courtisan qui lui faisait côtoyer l'empereur Napoléon III et les puissants ; son arrogant discours d'entrée à l'Académie française dénigrant son prédécesseur Émile Littré ; son aversion pour les libres penseurs ; sa lettre à Pedro II, empereur du Brésil, auquel il suggère qu'un condamné à mort puisse se voir proposer l'inoculation de la rage ou du choléra en guise de grâce… Tout cela est dit avec la grande délicatesse de l'écriture. C'est rassurant, Pasteur n'était pas un saint, mais un être humain au génie créateur.

Observateur extraordinaire et expérimentateur hors pair, Pasteur a su imposer certaines idées de ses prédécesseurs – Spallanzani, Jenner, Semmelweis… –, apportant d'irréfutables preuves expérimentales et de nouveaux concepts. Et son don pour la communication et la vulgarisation de ses découvertes le pousse à prendre à témoin l'opinion publique. Quel chercheur pourrait aujourd'hui imaginer convoquer la presse comme il le fit pour démontrer en direct l'efficacité d'une vaccination [contre la maladie du charbon, NDLR] ?

À l'heure de sa dernière découverte, la vaccination contre la rage, qui lui conférera une universelle reconnaissance, Pasteur a 63 ans. Les conditions dans lesquelles il pratique cette vaccination sont impensables de nos jours. Le péril de mort était sa justification. Et les malades afflueront du monde entier. La rue d'Ulm, à Paris, se transforme en cour des Miracles. Ainsi naîtra l'Institut Pasteur, d'un grand élan de générosité populaire par souscription publique.

Comme le souligne le titre du livre, l'œuvre de Pasteur se poursuivra bien après sa mort, dans ce lieu magique qu'est l'Institut Pasteur, berceau de tant de découvertes jusqu'à celle du virus du sida. L'esprit pastorien se diffusera dans un réseau mondial d'instituts, avec la mission de « soigner, chercher, enseigner ».

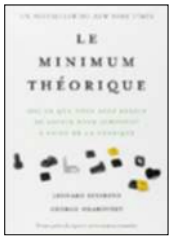
Finalement, l'audace d'Erik Orsenna est couronnée de succès. Même s'il n'approfondit pas le récit des découvertes, ce que l'on pourra regretter, son livre est un clin d'œil attendri et une promenade initiatique dans l'univers intime de Louis Pasteur. ■

Patrick Berche, directeur de l'Institut Pasteur de Lille

Fayard, 2015, 200 p., 18 €.

PHYSIQUE

Le Minimum théorique



Les notions de base de la physique, comme les lois de la dynamique, vous échappent ? Pas de panique ! Cet ouvrage, issu d'un cours public donné à l'université Stanford par l'un des auteurs, physicien théoricien reconnu, va vous aider à les appréhender (le cours est également disponible sur le Web, en vidéo et en anglais : http://theoreticalminimum.com). Le livre se divise en onze leçons, où même les équations, souvent effrayantes pour les profanes, sont décryptées avec un sens pédagogique remarquable.

Leonard Susskind et George Hrabovsky, *PPUR, 2015, 258 p., 19,90 €.*

SANTÉ

Vaccination : agression ou protection ?

Annick Guimezanes est une spécialiste de l'immunologie et Marion Mathieu, une biologiste qui anime des formations pour l'association Tous Chercheurs. Avec beaucoup de pédagogie, elles rappellent dans cet ouvrage le fonctionnement des vaccins, leur rôle, leurs qualités et leurs limites. Elles font également le point sur les recherches : les nouvelles stratégies d'administration, les antigènes et les adjuvants. Autant d'informations qui permettent de mieux comprendre les risques et les bénéfices de la vaccination, sur le plan individuel et collectif.

Annick Guimezanes et Marion Mathieu, *Inserm/Le muscadier, 2015, 125 p., 9,90 €.*

INFECTIOLOGIE

Le Petit Livre des grandes épidémies

Quels sont les trois plus grands tueurs de l'histoire de l'humanité ? La grippe, la peste et le sida… Le médecin et journaliste britannique Peter Moore, face aux crises épidémiques qui ne cessent d'occuper l'actualité, a eu l'idée d'établir la liste des 50 maladies infectieuses les plus virulentes. Pour chacune d'elles, il évoque l'histoire, la répartition à travers le monde, les symptômes et les traitements possibles. Et il souligne que *« notre meilleure chance de rester en bonne santé est de prendre au sérieux ces menaces invisibles ».*

Peter Moore, *Belin, 2015, 144 p., 12 €.*

CLIMAT

Menace sur le vin

Comment la vigne parviendra-t-elle à s'adapter au changement climatique ? Quel vin boira-t-on dans les prochaines décennies ? Voici quelques-unes des questions auxquelles répondent les journalistes Valéry Laramée de Tannenberg et Yves Leers, dans un ouvrage qui fait le point sur les grands enjeux qui attendent le secteur vitivinicole dans les années à venir. Ils proposent aussi une série de pistes à suivre, de la sélection génétique au développement du vin biologique, en passant par la délocalisation vers le nord ou l'adaptation des terroirs.

Valéry Laramée de Tannenberg et Yves Leers, *Buchet-Chastel, 2015, 128 p., 12 €.*

Intelligence artificielle

Le jour où mon robot m'aimera

***« Un robot émotionnel doté d'empathie »,* c'est ainsi que Masayoshi Son, P.-D.G. de la compagnie japonaise SoftBank, a présenté Pepper, son nouveau robot personnel, lors de son lancement commercial qui a eu lieu cette année. Dans cet essai, le psychiatre Serge Tisseron prend cette anecdote comme point de départ d'une réflexion sur les problèmes que poserait pour notre société l'apparition d'une empathie artificielle suffisamment élaborée. Il imagine que, dépourvus d'égoïsme, programmés pour satisfaire nos désirs, les robots deviendraient les compagnons idéaux, à la fois confidents, amis et amants. Leur existence même changerait irrémédiablement nos attentes et nos exigences au point que notre rapport à l'autre s'en trouverait bouleversé. Serge Tisseron alerte sur un autre point. Le robot — ultime objet connecté — serait un vecteur de données personnelles dont des fabricants peu scrupuleux pourraient tirer parti. À l'heure où la recherche en robotique et en intelligence artificielle fait des progrès fulgurants, ce livre invite à repenser notre rapport aux objets — en particulier aux robots — pour mieux préparer la révolution technologique qui s'annonce.**

Serge Tisseron, *Albin Michel, 2015, 220 p., 16 €.*

ENVIRONNEMENT

Climat - 30 questions pour comprendre la conférence de Paris

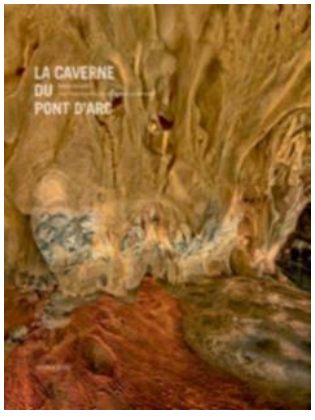
Trente questions réparties en quatre grandes parties (enjeux, diplomatie, accord et économie) : l'essai de Pascal Canfin, ancien ministre délégué au Développement du gouvernement de Jean-Marc Ayrault, et de Peter Staime, expert intervenant dans les négociations climatiques internationales, donne les clés pour comprendre les enjeux économiques, géopolitiques, financiers de la nouvelle « bataille de Paris ». Avec, en annexe, un guide pratique pour *« s'engager en 2015 pour le climat »* et un lexique pour *« comprendre le jargon des négociations climat ».*

Pascal Canfin et Peter Staime, *Les Petits Matins, 2015, 200 p., 12,25 €.*

Beau livre

La Caverne du Pont d'Arc

Découverte en 1994 dans le sud de l'Ardèche, la grotte Chauvet, qui s'étend sur plus de 8000 mètres carrés, renferme parmi les plus anciennes œuvres d'art de l'humanité. Afin d'en préserver les fresques exceptionnelles, le site est fermé depuis vingt ans, réservé aux scientifiques habilités. Le 25 avril dernier, une réplique a ouvert ses portes au public. Cet ouvrage retrace la naissance du projet et sa réalisation, notamment à travers les récits du préhistorien Jean Clottes. Réflexions préliminaires, élaboration des plans, scénographie, construction, reproduction des œuvres d'art réalisées il y a 36000 ans : toutes les étapes du chantier sont décrites dans les moindres détails. Le récit fait la part belle aux artisans de tous les corps de métier qui racontent les défis rencontrés au fil des mois et dictés par le cahier des charges : reproduire le plus fidèlement possible les éléments de la grotte originale. Ainsi, les dessins ont été réalisés avec des couleurs et des matériaux analogues à ceux utilisés par les hommes préhistoriques. Le tout est magnifiquement illustré.



Jean Clottes, David Hughet et Stéphane Compoint, *Actes Sud, 2015, 266 p., 39 €.*

SANTÉ

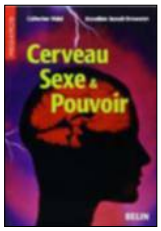
L'Homme malade de lui-même

« Un cri d'alarme ». C'est ainsi que Bernard Swynghedauw, directeur de recherches émérite à l'Inserm, définit son ouvrage au titre sans équivoque. Le changement climatique, les pollutions, le vieillissement de la population, les nouvelles variations saisonnières, ou encore la modification du *« paysage infectieux »* sont autant de causes de la dégradation de la santé humaine, et notamment du microbiote intestinal. Comment l'homme pourra-t-il y faire face ? Pour l'auteur, la solution tient en une phrase : *« Atténuer, si possible, pour se donner le temps de s'adapter. »*

Bernard Swynghedauw, *Belin, 2015, 256 p., 19,50 €.*

NEUROSCIENCES

Cerveau, sexe et pouvoir



Hommes et femmes ont-ils des cerveaux différents ? Catherine Vidal, neurobiologiste, et Dorothée Benoit-Browaeys, journaliste scientifique, s'attaquent aux idées reçues en les confrontant aux études les plus sérieuses. Elles rappellent quelques fondamentaux : grâce à ses propriétés de « plasticité », le cerveau se constitue et évolue tout au long de l'existence, et les inégalités sociales tirent leur origine d'un apprentissage plutôt que de différences innées. Cette nouvelle édition, dix ans après la première, est enrichie d'arguments tirés des recherches récentes.

Catherine Vidal et Dorothée Benoit-Browaeys, *Belin, 2015, 158 p., 9,90 €.*

PSYCHOLOGIE

60 questions étonnantes sur les parents

Les mères s'occupent-elles mieux de leur bébé s'il est mignon ? Le bonheur d'être parent varie-t-il avec l'âge ? La paternité précoce est-elle vouée à se répéter ? Autant de questions que peuvent se poser les parents ou futurs parents. Les auteurs, tous deux psychologues, tentent d'apporter des éclaircissements sur 60 points surprenants ou complexes de la parentalité. Chaque question est accompagnée en exergue par une étude scientifique expliquée dans les moindres détails.

Jean-Baptiste Dayez et Anne-Sophie Ryckebosch, *Mardaga, 2015, 144 p., 14,90 €.*

Lu d'ailleurs

Beyond Words What Animals Think and Feel

de Carl Safina

Il y a cinquante ans seulement, parler de conscience chez les animaux eût été inconcevable parmi les scientifiques. Aujourd'hui encore, bon nombre d'entre eux affirment qu'il est impossible de savoir ce que pensent nos amis les bêtes, et refusent de leur attribuer la moindre émotion, de peur d'être accusés de faire de l'anthropomorphisme. Dans son livre *Beyond Words: What Animals Think and Feel,* Carl Safina, professeur d'écologie à l'université de Stony Brook, à New York, et présentateur d'une émission télévisée sur la sauvegarde des océans, s'élève contre cette idée. *«Ne pas partir du principe que les animaux ont des pensées et des sentiments était un bon point de départ pour une nouvelle science. Soutenir qu'ils en sont dépourvus était de la mauvaise science »,* écrit-il.

Bien sûr, Carl Safina n'est pas le premier à se pencher sur la vie intérieure des animaux. Mais son livre rafraîchit le sujet. À la fois captivant et informatif, ce n'est pas un recueil scientifique passant en revue les travaux et les expériences sur la cognition animale, mais un témoignage sur la façon dont les animaux se comportent dans leur milieu naturel. Seule manière, selon l'auteur, d'étudier leurs émotions. Pour cela, il est allé à la rencontre des spécialistes qui travaillent sur le terrain. Trois chapitres permettent ainsi de rentrer dans l'intimité des éléphants, des loups et des orques. Et de se rendre compte à quel point leurs comportements et leurs relations sociales sont complexes. Par exemple, au sein d'une famille d'éléphants, c'est la matriarche qui prend des décisions et sa «personnalité» (calme, nerveuse, indécise, courageuse) peut influencer le devenir du clan. On observe aussi comment les loups coopèrent pour trouver des solutions.

Au fil du récit, Carl Safina efface la barrière – pour lui artificielle – entre les hommes et les animaux et montre, à travers des anecdotes et à la lumière des recherches récentes sur le cerveau, que les animaux peuvent éprouver des sentiments comparables à de la joie, de la tristesse, de la jalousie, de la colère, ou encore de l'amour. Fort de ce constat, l'auteur s'interroge : pourquoi certains continuent-ils à nier cette évidence ? Probablement parce que reconnaître que les animaux peuvent, eux aussi, penser fait tomber l'homme du piédestal sur lequel il s'est placé, avance-t-il. En nous faisant prendre conscience des liens de parenté qui nous unissent, le livre nous exhorte à porter un regard plus respectueux sur les autres êtres vivants.

Julien Bourdet, journaliste scientifique à Londres

Henry Holt and Co, *2015, 480 p., 20 £.*

SÉCURITÉ ALIMENTAIRE

Au risque de manger

« Recenser les risques alimentaires et indiquer les mesures de prévention applicables », tels sont les objectifs de ce livre dont l'un des auteurs, médecin gastro-entérologue, est aussi président de l'Académie des gastronomes.

L'ouvrage revient sur quelques idées arrêtées mais aussi sur les grands épisodes épidémiques et toxicologiques qui ont marqué l'Histoire (maladie de la vache folle, poulet à la dioxine, mildiou de la pomme de terre, etc.).

Ce qui permet de rappeler au passage que le risque sanitaire actuel n'a jamais été aussi faible.

Jean Vitaux et Marc Spielrein, *PUF, 2015, 336 p., 21 €.*

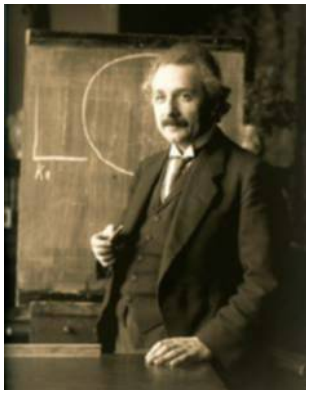
CULTURE

Portrait-Robot

Quelle image les robots nous renvoient-ils de nous-mêmes ? Publié à l'occasion de l'exposition « Portrait-Robot », au musée Maison d'ailleurs, à Yverdon-les-Bains, en Suisse, ce livre tente de répondre à la question. L'auteur s'intéresse en particulier à la signification métaphorique du robot dans la culture littéraire, le cinéma, la musique ou encore les jeux vidéo. Richement illustré, cet ouvrage propose un tour d'horizon des œuvres abordant ce thème, des romans d'Isaac Asimov à la saga cinématographique *Terminator* en passant par les albums du groupe Daft Punk.

Marc Atallah, *Favre, 2015, 192 p., 19 €.*

Cycle 1915-2015 : l'odyssée de l'espace-temps



À partir de 1915, Albert Einstein a provoqué une mutation profonde de la physique avec la théorie de la relativité générale. Comment est-il arrivé à une vision géométrique de l'espace-temps ? Comment a-t-il rendu possible une cosmologie prédictive et observationnelle ? Le palais de la Découverte propose une série de conférences rendant hommage à ces travaux. L'historien des sciences Jean Eisenstaedt inaugure ce cycle en replaçant cette théorie dans le contexte de l'époque : Albert Einstein cherchait dès 1907 une théorie de la gravitation cohérente avec la relativité restreinte. D'autres chercheurs évoquent ensuite les liens entre la relativité générale et le Big Bang ou les trous noirs, les moyens de tester cette théorie, et ses implications philosophiques.

Du 15 octobre au 10 décembre, Paris, palais de la Découverte

http://tinyurl.com/palais-decouverte-espace-temps

EXPOSITIONS

Jusqu'au 31 octobre

Fossiles

Découvrez la beauté et l'étrangeté des fossiles, dont les formes pétrifiées ont éveillé la curiosité des hommes, en particulier les savants des Lumières. Dans l'esprit des cabinets d'histoire naturelle du XVIIIe siècle, une collection de fossiles raconte la naissance de la paléontologie, entre art et science.

La Rochelle (Charente-Maritime), Muséum d'histoire naturelle.

http://tinyurl.com/larochelle-fossiles

Jusqu'au 1er novembre

Space Girls Space Women, l'espace à travers le regard des femmes

Il y a cinquante-deux ans, Valentina Terechkova devenait la première femme cosmonaute, et la seule à avoir effectué un voyage en solitaire dans l'espace. À travers dix-huit reportages photographiques inédits, de Nairobi à Moscou et de Bangalore au désert d'Atacama, découvrez des portraits de femmes qui sont aujourd'hui au cœur de l'aventure spatiale.

Paris, musée des Arts et Métiers.

http://tinyurl.com/femmes-espace

Jusqu'au 1er novembre

Les oiseaux : l'envol des dinosaures

Certaines familles de dinosaures ont évolué jusqu'à devenir les oiseaux actuels. L'exposition raconte cette évolution, et la façon dont les chercheurs ont établi cette lointaine parenté, à partir de la découverte de fossiles présentant des caractères d'oiseaux et de reptiles.

Villers-sur-Mer (Calvados), Paléospace.

http://tinyurl.com/paleospace-oiseaux

Jusqu'au 1er novembre

Insectes bâtisseurs

Depuis des millénaires, les hommes sont fascinés par les insectes sociaux tels que les abeilles, les guêpes, les fourmis et les termites. Cette exposition propose de découvrir leurs nids, qui présentent une grande variété de formes, de structures, de tailles et de matériaux, et dont l'élaboration résulte parfois de l'organisation de dizaines voire de centaines de milliers d'individus.

Savigny-en-Véron (Indre-et-Loire), écomusée du Véron.

http://tinyurl.com/insectes-batisseurs

FESTIVALS

Du 26 septembre au 11 octobre

Festival des sciences

Comment produire de l'électricité en mer ? Comment maîtriser les virus ? Comment évoluent les télécommunications ? Le programme de ce festival, riche en conférences, expositions, expériences et découvertes du patrimoine archéologique ou de la nature, invite le public à rencontrer des scientifiques pour échanger autour des recherches menées dans la région.

Rennes Métropole (Ille-et-Vilaine).

www.espace-sciences.org/festival-des-sciences-2015

Du 1er au 6 octobre

Pariscience

En plus des habituels documentaires, qui traiteront cette année de la lumière et du climat, le festival international du film scientifique propose des longs-métrages de fiction.

F.SCHMUTZER/DR - JEAN-LOUIS RÉMY-MUSEUM LR - DR

Ces films, sur le thème de l'intelligence artificielle, sont l'occasion de débattre avec des chercheurs à l'issue de chaque projection.
Paris, Muséum national d'histoire naturelle et autres lieux.
www.pariscience.fr

Du 7 au 11 octobre
Fête de la science

Comme chaque année, à travers toute la France, les chercheurs viennent à la rencontre du grand public. La lumière, thème de l'année 2015, sera au cœur de conférences et d'animations, à travers notamment les lasers ou l'astrophysique.

À l'approche de la COP21, cette édition fait la part belle au réchauffement climatique : l'occasion de comprendre le phénomène et ses conséquences.
Dans toute la France.
www.fetedelascience.fr

Les 8 et 9 octobre
Savante banlieue

Comment a évolué le climat en 150 000 ans ? Quelles énergies pourraient nous aider diminuer notre impact ? Ces questions seront abordées au cours de ces deux jours de conférence. La lumière est également au programme : comment la science l'a-t-elle étudiée depuis le Moyen Âge ? Comment interagit-elle avec l'atmosphère ?
Villetaneuse et Saint-Denis (Seine-Saint-Denis), campus Paris-XIII et Paris-VIII.
www.savantebanlieue.com

CONFÉRENCES

Le 1er octobre, 18 h 30
Ma thèse en 180 secondes

Vulgariser son sujet de recherche, simplement et en trois minutes : c'est le défi qu'ont relevé les doctorants ayant participé au concours « Ma thèse en 180 secondes ». Pour cette finale francophone, onze finalistes venus de France, du Maroc, du Québec, ou encore de Belgique, sont réunis pour présenter leurs travaux au public.
Paris, la Sorbonne.
http://mt180.fr

Le 6 octobre, 19 h
Les astronomes et la lumière, une longue et belle histoire

Nos télescopes géants, qu'ils soient sur les montagnes terrestres ou dans l'espace lointain, capturent la lumière de l'Univers et nous apportent de précieuses informations. Mais que savons-nous de cette lumière, interroge l'astrophysicien Pierre Léna, et comment l'avons-nous appris au fil des siècles ?
Paris, Institut d'astrophysique.
http://tinyurl.com/IAP-mardis

Le 7 octobre, 20 h 30
Quels sont les enjeux de la chimie verte ?

L'industrie chimique utilise des dérivés du pétrole, et bientôt d'autres ressources. Stéphane Sarrade, chef du département de physico-chimie du CEA, explique comment la chimie « verte » réduit l'usage de matières premières fossiles, la consommation d'énergie et la production de déchets.
Poitiers (Vienne), espace Mendès-France. *http://tinyurl.com/emf-chimie-verte*

Le 15 octobre, 18 h
Céramiques de Méditerranée occidentale

Le Néolithique constitue une révolution des rapports entre l'homme et son environnement, notamment par l'apparition de nouvelles techniques. Le préhistorien Didier Binder revient sur les découvertes récentes autour du développement de la céramique.
Nice (Alpes-Maritimes), Musée d'Archéologie, Site de Terra Amata.
http://tinyurl.com/nice-ceramique

Le 20 octobre, 20 h 30
L'astronomie des anciens

Quelle que soit la civilisation à laquelle il appartient, l'être humain cherche dans le ciel des réponses sur son origine, son avenir et sa finalité. L'astrophysicienne belge Yaël Nazé rappelle que l'astronomie trouve sa source dans les mythes célestes par lesquels les Anciens expliquaient l'ordre du monde et la place qu'ils y occupaient.
Rennes (Ille-et-Vilaine), Espace des sciences.
www.espace-sciences.org

Le 21 octobre, à 16 h 29 très précisément
Le Mag Surf : un skate supraconducteur

En 1989, le film *Retour vers le Futur* imaginait qu'en 2015, nous nous déplacerions en skate-board volant. Nous y sommes !

Des chercheurs du laboratoire matériaux et phénomènes quantiques vous invitent à découvrir le Mag Surf, capable de léviter à quelques centimètres de rails magnétiques, avec une charge de 100 kg.
Paris, université Paris-Diderot. *http://tinyurl.com/diderot-mag-surf*

Le Train du climat

En décembre, à Paris, aura lieu la 21e conférence des Nations unies sur les changements climatiques (COP21). En prévision de cet événement, un collectif de scientifiques investis dans la recherche fondamentale sur le climat parcourt la France à bord du Train du climat. Partant de Paris, l'équipage fait escale dans 19 villes, dont Marseille, Tours, Brest ou Dunkerque, jusqu'à l'arrivée à Nancy. À bord du train, une exposition ludique et des conférences ont pour but d'expliquer au grand public les enjeux liés au phénomène du réchauffement climatique. Des pistes de réflexion sur les solutions sont également présentées.
Du 6 au 25 octobre, de 10 h à 19 h, dans 19 villes de France. *http://tinyurl.com/train-climat*

DR - ERIC DESCARPENTRI

Pourquoi mon rideau de douche me colle-t-il à la peau?

N'en déplaise à votre sex-appeal, les rideaux de douche adhèrent à tout le monde, sans distinction d'âge, de taille ou de coupe de cheveux. En fait, le morceau de tissu imperméable n'a pas plus envie de s'attacher à vous que vous d'endurer son étreinte, il ne fait que subir des pressions, au sens propre.

Votre cabine de douche subit en effet une légère dépression, dès que l'eau commence à couler. Ainsi, la pression de l'air à l'extérieur de la douche devient supérieure à celle de l'endroit où vous vous lavez. L'air extérieur se précipite alors à l'intérieur pour combler le vide et essayer de rétablir l'équilibre, entraînant le rideau au passage. Plusieurs phénomènes physiques participent à diminuer la pression dans votre cabine. L'un d'entre eux est la convection. Sous l'effet de l'eau chaude, l'air à l'intérieur de la douche se réchauffe. Plus léger que l'air à température ambiante, cet air chaud s'échappe par le haut, créant ainsi une légère dépression.

Mais cela n'explique pas tout, puisque le rideau s'agite même chez les adeptes de la douche… froide ! Une autre explication est fournie par le théorème de Bernouilli, qui prévoit que l'accélération d'un fluide provoque une diminution de pression. Ainsi, l'air entraîné par le jet d'eau est accéléré, créant un faible vide. À ces deux explications théoriques s'ajoute celle de David Schmidt, professeur à l'université du Massachusetts, et qui lui a valu un prix Ig Nobel en 2001, décerné en récompense d'une découverte bizarre ou absurde. Grâce à un logiciel à 28 000 dollars, l'Américain est parvenu à simuler 30 secondes de l'écoulement d'une douche. Il a alors montré que les gouttes d'eau expulsées par le pommeau transmettaient une partie de leur énergie à l'air environnant, créant une minitornade horizontale, dont le cœur souffre d'une sous-pression.

Le mouvement du rideau élucidé, revenons à son attirance à votre égard. Si le rideau vous colle, il faut plutôt y voir une interaction entre deux surfaces mouillées qu'un geste d'affection. En effet, l'eau a horreur d'être en contact avec l'air. À la première occasion, elle le fuit. Aussi, dès que les gouttelettes qui vous couvrent entrent en contact avec celles sur votre rideau, elles fusionnent pour diminuer la surface d'eau exhibée à l'air. En clair, l'eau aime l'eau, et le rideau ne fait que suivre le mouvement. Quelles que soient vos mensurations.

Clément Delorme

Jean-Michel Thiriet

JEUDI 22 OCTOBRE 2015 À 19H
MUSÉE DU QUAI BRANLY

LE PRIX La Recherche

LA SCIENCE EN AVANCE

12e ÉDITION

RENSEIGNEMENTS & INSCRIPTIONS
www.leprixlarecherche.com

EN PARTENARIAT AVEC

DUNOD

RENAULT
La vie, avec passion

ITME
SCIENTIFIC SOLUTIONS

AVEC LE SOUTIEN DE

arte FUTURE

L'OBS

mgen
MUTUELLE
SANTÉ
PRÉVOYANCE
MA SANTÉ, C'EST SÉRIEUX.
J'AI
CHOISI
MGEN
Maladie, dentaire, optique, mais aussi prévoyance intégrée et services d'accompagnement en cas de coups durs : MGEN garantit une protection performante à chaque moment de ma vie et couvre efficacement mes frais de santé. Pour ma santé, je veux être bien entourée : comme près de 3,8 millions de personnes, j'ai choisi MGEN.
www.antigel.agency - 00209 - Photo © Getty Images. Document non contractuel.
mgen.fr
MGEN, Mutuelle Générale de l'Education Nationale, n°775 685 399, MGEN Vie, n°441 922 002, MGEN Filia, n°440 363 588, mutuelles soumises aux dispositions du livre II du code de la Mutualité - MGEN Action sanitaire et sociale, n°441 921 913, MGEN Centres de santé, n°477 901 714, mutuelles soumises aux dispositions du livre III du code de la Mutualité.